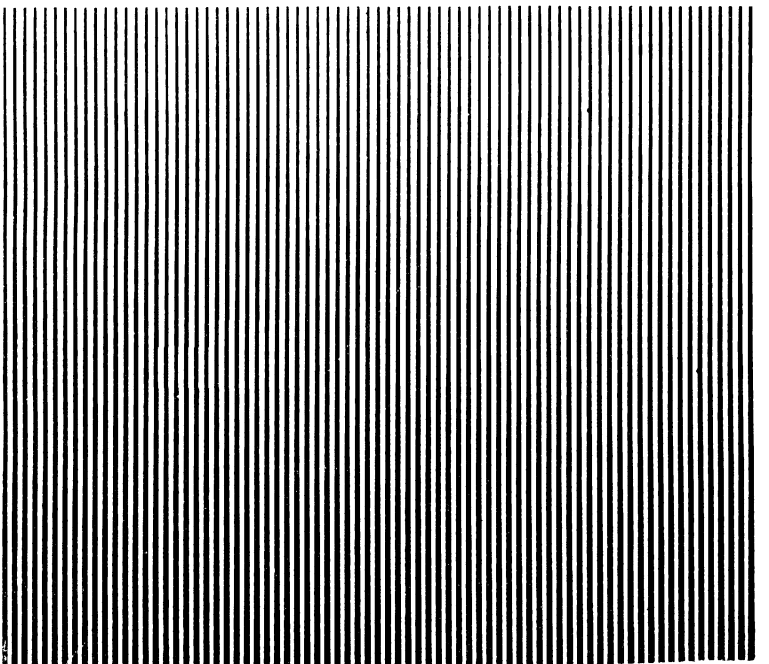
В. В. ЕРМУРАТСКИЙ, П. В. ЕРМУРАТСКИЙ

КОНДЕНСАТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ



В. В. ЕРМУРАТСКИЙ
П. В. ЕРМУРАТСКИЙ

КОНДЕНСАТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

МОСКВА «ЭНЕРГИЯ» 1979

ББК 31.264.6
Е 74
УДК 621.319.4.025:621.314.632

Ермуратский В. В., Ермуратский П. В.

Е 74 Конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях.— М.: Энергия, 1979.— 224 с., ил. 65 к.

В книге приводятся сведения об особенностях работы конденсаторов в тиристорных преобразователях, о свойствах и основных характеристиках современных типов конденсаторов. Описаны принципы выбора конденсаторов для работы на синусоидальном и несинусоидальном напряжении. Рассмотрены вопросы определения допустимых электрических и тепловых нагрузок конденсаторов.

Книга предназначена для инженеров и научных работников, занимающихся вопросами разработки силовых преобразовательных устройств с применением конденсаторов. Она может быть полезна студентам старших курсов электротехнических вузов.

Е $\frac{30307\text{-}391}{051(01)\text{-}79}$ 126-79. 2302030000

ББК 31.264.6
6П2.1.082

© Издательство «Энергия», 1979 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Конденсаторы переменного тока в настоящее время широко применяются в электроэнергетических системах, электротехнических и электронных устройствах. Традиционная сфера их применения — электроэнергетика, где они используются для компенсации реактивной мощности потребителей и линий электропередач (так называемые силовые косинусные конденсаторы поперечной и продольной компенсации), в фильтрах преобразовательных подстанций, в устройствах емкостного отбора мощности. Широко применяются конденсаторы для компенсации реактивной мощности электротермических установок, пуска и работы конденсаторных двигателей, для компенсации реактивной мощности и обеспечения нормальной работы люминесцентных светильников и других целей.

Интенсивное развитие силовой преобразовательной техники, обусловленное освоением промышленного производства кремниевых управляемых и неуправляемых полупроводниковых приборов и устройств на их базе, привело к значительному расширению сферы применения конденсаторов.

Режимы работы конденсаторов силовых полупроводниковых преобразовательных устройств в ряде случаев применения близки к режимам работы силовых косинусных конденсаторов. Однако значительная часть конденсаторов силовых полупроводниковых преобразовательных устройств работает в режимах, подобных режимам работы накопительных конденсаторов устройств лазерной и радиолокационной техники, т. е. для них характерны импульсный режим работы, существенная несинусоидальность тока и напряжения, повторно-кратковременный характер нагружения и т. д.

В связи с существенным усложнением режимов работы таких конденсаторов по сравнению с применениями на синусоидальном напряжении значительно возросли

трудности оценки работоспособности конденсаторов, т. е. определения допустимости того или иного режима.

В настоящее время имеющаяся у потребителей информация о конденсаторах все еще недостаточна для выбора оптимального типа конденсатора при различных условиях эксплуатации.

Приближенный выбор конденсаторов, а в ряде случаев субъективная оценка допустимости режимов приводят в лучшем случае к недоиспользованию энергетических возможностей конденсаторов и, следовательно, к завышению масса-габаритных характеристик батарей. В худшем случае возможны отказы устройств из-за выхода из строя конденсаторов в результате перегрузок. Так, зарубежные литературные данные свидетельствуют о том, что значительная часть отказов в электронной аппаратуре происходит из-за конденсаторов, причем в большинстве случаев преждевременный выход из строя связан с неправильным выбором конденсаторов.

В последнее десятилетие увеличилось число публикаций, посвященных вопросам конструирования и общих свойств конденсаторов переменного тока [П-1—П-3]. Вместе с тем весьма актуальные вопросы исследования характеристик конкретных типов конденсаторов и их применения в различных условиях эксплуатации все еще недостаточно освещаются в периодической печати. Вышедшая в 1976 г. работа [П-4] в некоторой мере восполнила отмеченный пробел.

В предлагаемой вниманию читателей книге авторы на основе собственных разработок и исследований, а также обобщения литературных данных осветили комплекс вопросов, возникающих при выборе конденсаторов переменного тока для тиристорных преобразователей; изложили основные сведения об условиях работы конденсаторов в тиристорных преобразователях, об электрофизических процессах, протекающих в конденсаторах, а также основные характеристики конденсаторов, что позволило обоснованно подойти к задачам оценки работоспособности конденсаторов; рассмотрели вопросы определения допустимого синусоидального и несинусоидального напряжений для конденсаторов различных типов, а также выбора их для работы в тиристорных преобразователях. Приведенные в книге методы в значительной мере применимы также к конденсаторам постоянного тока.

Авторы полагают, что их книга расширит и углубит представление о конденсаторе как элементе электронных и электротехнических устройств и в определенной мере облегчит решение конкретных задач при проектировании тиристорных преобразователей.

Работа между авторами была распределена следующим образом: гл. 1, 3 и 5 написаны В. В. Ермуратским, гл. 2 и 4 — совместно.

Авторы понимают, что их книга не лишена недостатков, и с благодарностью примут все замечания и пожелания, которые следует направлять в адрес издательства «Энергия»: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Авторы

ГЛАВА ПЕРВАЯ

УСЛОВИЯ РАБОТЫ КОНДЕНСАТОРОВ В ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

1-1. ФУНКЦИИ КОНДЕНСАТОРОВ В ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Современная силовая полупроводниковая техника насчитывает большое количество разнообразных базовых схем, устройств и их модификаций, число которых непрерывно растет [1-1—1-13]. На рис. 1-1 приведена классификация основных видов устройств по функциональному признаку и по способу коммутации вентилей. Классификация может быть расширена, например делением автономных инверторов на инверторы тока, напряжения и резонансные, а также по другим признакам — схематическим, способам коммутации и т. д. [1-13—1-15].

Во всех схемах тиристорных преобразователей (ТП) конденсаторы переменного тока присутствуют как вспомогательные элементы, а в большей части ТП — и как основные.

Несмотря на большое разнообразие электрических режимов работы конденсаторов в ТП можно выделить следующие основные функции, выполняемые конденсаторами [1-3, 1-16]: коммутация вентилей с неполной управляемостью (функция накопителя энергии); демпфирование пиков напряжения (функция накопителя энергии); фильтрация высших гармоник тока и напряжения (частотнозависимое сопротивление); компенсация реактивной мощности ТП (способность обмениваться энергией с другими реактивными элементами).

В соответствии с перечисленными функциями конденсаторы ТП делятся на коммутирующие, демпфирующие, фильтровые и компенсирующие. В некоторых схемах автономных инверторов тока одни и те же кон-

денсаторы выполняют одновременно три функции — коммутации вентилей, фильтрации высших гармоник и компенсации реактивной мощности [1-3, 1-13, 1-17—1-19]. Каждая из указанных групп конденсаторов имеет свои специфические особенности электрического режима работы, обусловленные их функциональным назначением и особенностями режимов работы ТП различного назначения.

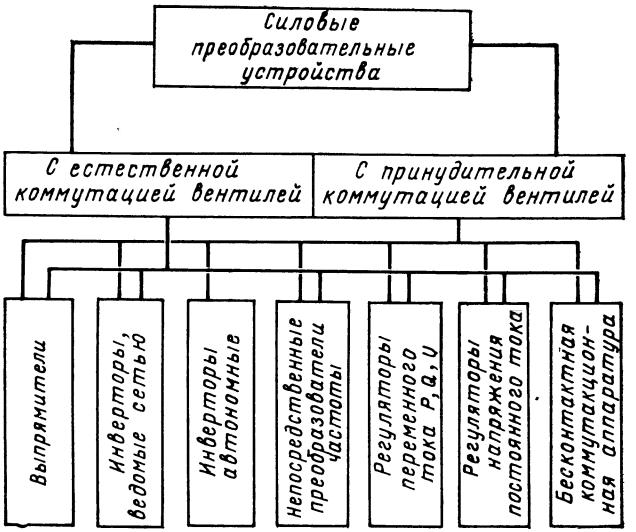


Рис. 1-1. Классификация основных видов силовых полупроводниковых устройств.

Вместе с тем имеется ряд общих для всех групп конденсаторов особенностей режимов, на которых целесообразно остановиться. Конденсаторы, являющиеся элементами электрической схемы преобразовательных устройств, наравне с вентильным и электромагнитным оборудованием воспринимают электрические нагрузки, продолжительность, интенсивность и другие параметры которых определяются режимами работы всего ТП и которые в свою очередь зависят от его назначения, характера нагрузки и других факторов.

Электрический режим работы конденсаторов характеризуется формой, частотой и амплитудой воздейству-

ющего напряжения. Результирующее тепловыделение в конденсаторе, в значительной мере определяющее его работоспособность, как показано в § 3-2, 4-3, 4-4, зависит от всех этих параметров электрического режима.

Режимы работы конденсаторов в ТП можно подразделить на длительные и кратковременные. В свою очередь длительные режимы могут быть непрерывными и повторно-кратковременными или циклическими. В зави-

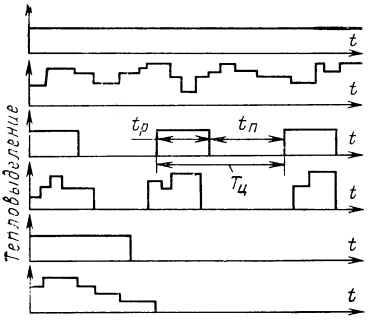


Рис. 1-2. Условное графическое изображение режимов работы конденсаторов ТП. *1* — непрерывный (длительный) простой режим работы; *2* — непрерывный (длительный) сложный; *3* — повторно-кратковременный простой; *4* — повторно-кратковременный сложный; *5* — кратковременный простой; *6* — кратковременный сложный.

симости от того, изменяются ли параметры электрической нагрузки на конденсаторы или нет, длительные (непрерывные и повторно-кратковременные) и кратковременные режимы могут быть простыми или сложными.

Условное графическое изображение перечисленных режимов работы приведено на рис. 1-2.

Длительный непрерывный простой режим работы характеризуется стационарным состоянием тепловыделения в конденсаторе. В длительном непрерывном сложном режиме в результате периодических или непериодических изменений электрической нагрузки тепловыделение нестационарно.

Нестационарное тепловыделение в конденсаторах имеет место также при повторно-кратковременных режимах работы, которые могут быть как периодическими, так и непериодическими.

При повторно-кратковременном режиме различают продолжительность работы $t_р$, длительность паузы $t_п$ и длительность цикла $T_ц$ (рис. 1-2). Этот режим характеризуется относительной продолжительностью включения

$$ПВ = \frac{t_р}{t_р + t_п} 100\% = \frac{t_р}{T_ц} 100\%.$$

В кратковременном режиме тепловыделение в конденсаторах также нестационарно, однако этот режим — однократный, т. е. он не является циклическим.

Кроме стационарных электрических нагрузок в нормальных рабочих (технологических) режимах конденсаторы ТП подвергаются воздействию кратковременных или повторно-кратковременных нагрузок в переходных режимах как в рабочих, так и в аварийных режимах при авариях в самом ТП или в цепях нагрузки, подключенной к ТП [1-2, 1-4, 1-20—1-24].

Важной характеристикой режима работы конденсаторов ТП является основная частота напряжения на них (частота 1-й гармоники).

Основная частота напряжения, воздействующего на конденсаторы ТП, зависит от вида ТП, способа коммутации вентилей, частоты питающего и выходного напряжения.

В современных регулируемых и стабилизированных ТП частота переключения вентилей может находиться в пределах от долей герца до нескольких десятков тысяч герц. При этом в регулируемых по частоте преобразователях частота может изменяться в десятки раз [1-11, 1-15, 1-25, 1-26].

Существенно разнообразие форм напряжения на конденсаторах ТП: количество форм больше числа схем, поскольку при изменении режима работы в ряде схем ТП изменяется также форма воздействующего напряжения. Тем не менее можно выделить следующие типовые формы напряжений:

синусоидальное или близкое к синусоидальному (с малым коэффициентом гармоник), характерное для компенсирующих конденсаторов и некоторых применений демпфирующих и коммутирующих конденсаторов;

синусоидальное, но значительно искаженное высшими гармониками, характерное для фильтровых конденсаторов;

трапецеидальные симметричные и асимметричные формы, характерные для большинства применений коммутирующих конденсаторов в автономных инверторах, импульсных регуляторах постоянного тока, вентильных источниках реактивной мощности;

пикообразное, с нулевыми паузами, сложной формы, характерное для демпфирующих конденсаторов *RC*-цепочек вентилей ТП.

Возможны также комбинированные формы напряжений достаточно сложной формы, имеющие синусоидальную составляющую основной частоты и трапецеидальную или треугольную составляющую повышенной частоты [1-3].

1-2. КОММУТИРУЮЩИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Коммутирующие конденсаторы составляют наиболее специфическую группу конденсаторов ТП. К этой группе можно также отнести накопительные конденсаторы с полным разрядом различных импульсных устройств в силу близости их электрических режимов работы [1-2, 1-10, 1-27]. Коммутирующие конденсаторы используются как источник энергии для принудительного (искусственного) выключения, переключения или включения управляемых, а также неуправляемых вентилей в те моменты времени, когда они не могут самостоятельно (под действием напряжения питающей или выходной сети) включиться или выключиться.

В настоящее время принципы выполнения узлов коммутации вентилей, процессы коммутации, классификация коммутирующих узлов достаточно хорошо известны [1-1, 1-3, 1-5, 1-6, 1-8, 1-11, 1-13, 1-14].

Многочисленные схемы ТП с принудительной коммутацией вентилей базируются на нескольких основных вариантах структур коммутационных узлов. Принято различать схемы параллельной и последовательной коммутации [1-11, 1-14].

Известно также деление схем принудительной коммутации на схемы двухступенчатой и одноступенчатой коммутации [1-3, 1-11, 1-13].

Целесообразно также выделить схемы коммутационных узлов с ограничением максимального напряжения на конденсаторах, что делается с помощью дополнительных элементов силовой схемы и без ограничения этого уровня [1-3, 1-6, 1-11].

В схемах с ограничением напряжения амплитуда напряжения на коммутирующем конденсаторе обычно равна или несколько больше напряжения питания (в импульсных регуляторах постоянного тока, автономных инверторах напряжения) или амплитуды фазного или линейного напряжения (в выпрямителях и инверторах тока с принудительной коммутацией вентилей).

В ТП без ограничения напряжения на коммутирующем конденсаторе его амплитуда может в несколько раз превышать напряжение источника питания.

Необходимо отметить, что как требуемая емкость коммутирующих конденсаторов, так и амплитуда напряжения на них зависят от диапазона регулирования или диапазона изменения нагрузки [1-3]. В [1-1; 1-3; 1-6; 1-11 и др.] приводятся подробное рассмотрение структур коммутационных узлов и анализ электромагнитных процессов в ТП.

Напряжение на идеальном конденсаторе для любого интервала времени определяется начальным значением напряжения на конденсаторе и током через него[1]:

$$u_C(t) = U_C(0) + \frac{1}{C}\int_0^t i_C(t)\,dt, \qquad (1\text{-}1)$$

где $U_C(0)$ — начальное значение напряжения на конденсаторе; C, $i_C(t)$ — соответственно емкость и мгновенное значение тока конденсатора.

Ток через конденсатор в отдельные моменты времени может быть равен нулю (рис. 1-3,*а*), быть постоянным по значению (например, если конденсатор перезаряжается от источника тока) (рис. 1-3,*б*), изменяться по колебательному, экспоненциальному закону (например, в случае, когда конденсатор подключен к источнику напряжения через линейный дроссель, резистор), (рис. 1-3,*в*, *г*) или по более сложному закону в случае, если цепь, содержащая конденсатор, является нелинейной.

Таким образом, в ТП напряжение на коммутирующих конденсаторах определяется протекающим током, зависящим от параметров, элементов, структуры и закона управления силовой схемы. Кривая напряжения, как правило состоит из отрезков прямых линий, частей затухающих гармонических или экспоненциальных функций.

На рис. 1-4,*а*—*г* приведены идеализированные формы напряжения и тока коммутирующих конденсаторов, наиболее часто встречающиеся в ТП. Здесь $U_{п.п}$ — полный размах напряжения (от пика до пика), $T_п$ — период

[1] Идеальный конденсатор обладает только емкостью.

повторения. Известны модификации приведенных кривых $u_C(t)$, отличающиеся формами фронтов, постоянной составляющей напряжения на конденсаторе, скважностью и т. д.

В реальных ТП токи и напряжения имеют более сложный вид, поскольку полупроводниковые вентили неидеальны: имеют ненулевой ток утечки, приводящий к разряду коммутирующего конденсатора во время бес-

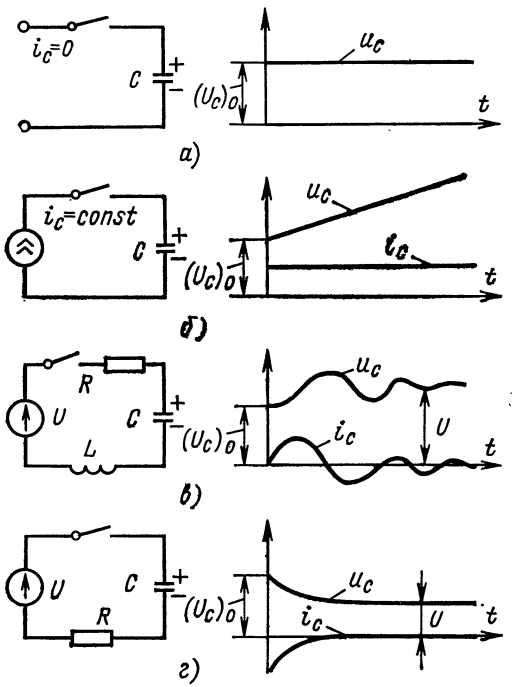


Рис. 1-3. Основные схемы включения коммутирующих конденсаторов ТП и формы напряжения и тока.

токовой паузы, что приводит к спаду вершины импульса напряжения и уменьшению напряжения на конденсаторе перед очередной коммутацией, а также из-за броска обратного тока вентилей. На рис. 1-4,*а* разряд коммутирующего конденсатора обратным током вентиля при его включении показан пунктирной линией.

В некоторых схемах ТП коммутирующий конденсатор остается включенным в силовую схему и после комму-

тации вентилей, в результате чего через конденсатор протекает затухающий ток.

Поскольку при этом могут меняться параметры контуров, в которые включается конденсатор при изменении структуры цепи из-за запирания и отпирания управляемых и неуправляемых вентилей ТП, ток и напряжение на конденсаторе приобретают довольно сложную форму (рис. 1-5). Заряд коммутирующего конденсатора в не-

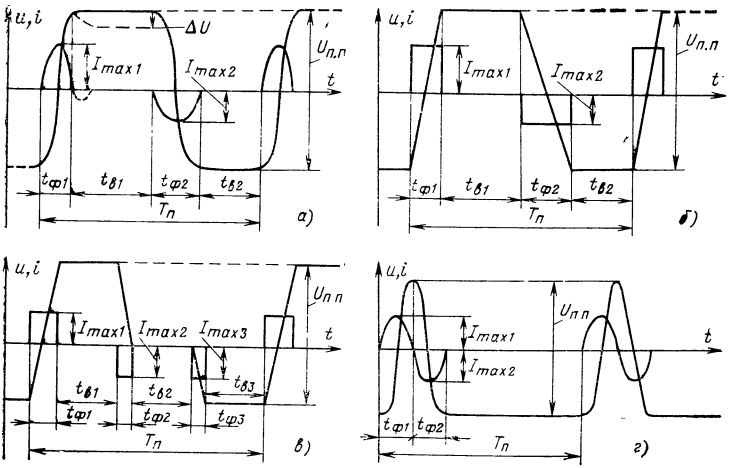


Рис. 1-4. Идеализированные формы напряжения и тока коммутирующих конденсаторов ТП.

а — в схеме с линейным дросселем в контуре коммутации; *б* — в схеме с нелинейным дросселем в контуре коммутации, а также в некоторых схемах выпрямителей, источников реактивной мощности и автономных инверторов тока с двухступенчатой принудительной коммутацией; *в* — в схемах автономных инверторов тока, выпрямителей с принудительной коммутацией с отсекающими диодами или тиристорами; *г* — в схемах ТП с резонансной коммутацией.

которых схемах ТП производится не от постоянной э. д. с., а от переменной во времени (например, от сетевого напряжения), что также приводит к более сложному закону изменения напряжения и тока конденсатора.

В ряде схем ТП через коммутирующий конденсатор в течение всего или части интервала перезаряда протекает ток нагрузки, который при малой индуктивности нагрузки или фильтра изменяется во времени в течение

интервала перезаряда, что также приводит к более сложным, чем показанные на рис. 1-4,*а—г*, формам напряжения и тока. На практике для расчетов обычно используются идеализированные формы напряжения и тока.

Схемные решения в ТП, направленные на улучшение коммутационных и частотных свойств узлов коммутации (форсировка перезаряда, формирование импульсов коммутирующего тока специальной формы и др.), также приводят к усложнению форм токов и напряжений на коммутирующих конденсаторах[1] [1-6, 1-11].

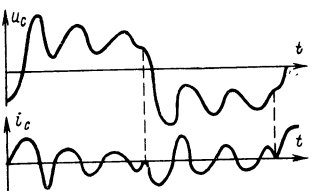


Рис. 1-5. Ток и напряжение конденсатора в контуре с изменяющимися структурой и параметрами.

Изменение формы напряжения на конденсаторе возникает также в результате того, что сам процесс коммутации тока вентилей имеет конечную длительность, которая зависит от индуктивности контура коммутации [1-3]. Так, при относительно большой индуктивности контура коммутации, например если в контуре коммутации оказывается сопротивление рассеяния трансформатора (например, в мостовом преобразователе Саба—Каганова с одним коммутирующим конденсатором и двумя коммутирующими вентилями [1-3] или в схеме трехфазного или однофазного преобразователя с отсекающими вентилями [1-3, 1-9] при нагрузке индуктивного характера), происходит существенное затягивание процесса коммутации, влекущее за собой соответствующее изменение тока и напряжения коммутирующего конденсатора.

При изменении тока нагрузки меняется скорость перезаряда коммутирующего напряжения

$$du_C(t)/dt = i_C(t)/C, \qquad (1\text{-}2)$$

где $i_C(t) = i_н(t)$ — ток нагрузки.

Емкость выбирается из условия обеспечения восстановления запирающих свойств тиристора.

---

[1] Усложнение формы воздействующего на коммутирующий конденсатор напряжения не всегда приводит к ощутимому росту нагрузок на конденсатор и его установленной мощности.

Для большинства узлов принудительной коммутации основное расчетное соотношение для определения емкости коммутирующего конденсатора [1-3, 1-11, 1-28, 1-29] имеет вид:

$$C = k_C \frac{i_в t_в}{U},$$

или

$$C = k'_C \frac{P t_в}{U^2}, \qquad (1\text{-}3)$$

где $i_в$ — ток выключаемого вентиля; $t_в$ — расчетное время восстановления вентиля; U — напряжение питания; k_C, k'_C — коэффициенты, зависящие от схемы ТП; P — мощность ТП.

Таким образом, емкость коммутирующих конденсаторов зависит от схемы и мощности преобразователя, питающего напряжения, времени восстановления запирающих свойств вентиля и коэффициента запаса (определяющих расчетное время восстановления $t_в$).

Из (1-3) следует, что чем меньше время восстановления вентиля $t_в$, тем меньше необходимая для коммутации емкость конденсатора. С понижением напряжения питания емкость коммутирующих конденсаторов быстро растет (при P и $t_в$=const).

Современные тиристоры обеспечивают время $t_в = 50 \div 100$ мкс, что при $P = 10$ кВт и $U = 100$ В обусловливает необходимую емкость $C = 100 \div 300$ мкФ. С ростом мощности ТП согласно (1-3) емкость коммутирующих конденсаторов пропорционально возрастает (при U = const).

В настоящее время для регулирования в ТП применяют частотные, широтно-импульсные, фазоимпульсные, амплитудно-импульсные и комбинированные принципы управления [1-3, 1-6, 1-7, 1-8, 1-11, 1-26]. При регулировании могут изменяться частота, длительность и форма токов через коммутирующий конденсатор и соответственно форма и амплитуда, продолжительность бестоковых пауз (т. е. длительность фронтов $t_{ф1}$, $t_{ф2}$, $t_{ф3}$, вершин $t_{в1}$, $t_{в2}$, $t_{в3}$ — рис. 1-4,*а—г*).

В ТП изменение формы и уровня напряжения на коммутирующих конденсаторах может происходить вследствие изменения режимов работы (например, при

изменении нагрузки, ее фазового угла или одновременного изменения и того и другого [1-3]).

На рис. 1-6 показано изменение формы напряжения на коммутирующем конденсаторе преобразователя постоянного напряжения в ток, близкий к синусоидальному [1-30].

В схеме преобразователя применена фиксация напряжения на коммутирующем конденсаторе (конденсатор перезаряжается током нагрузки и является в этом случае одновременно элементом, дозирующим порции энергии, поступающие в нагрузку от источника питания).

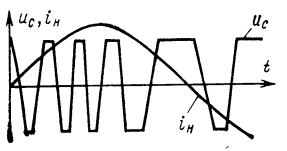


Рис. 1-6. Изменение формы напряжения на конденсаторе и тока нагрузки [1-30].

Итак, особенностями электрических режимов работы коммутирующих конденсаторов в большинстве схем ТП являются:

импульсный характер тока через конденсатор со значительными по сравнению с режимом работы на синусоидальном напряжении удельными нагрузками коммутирующих конденсаторов, действующим и амплитудным токами, достигающими в современных ТП соответственно 1—10 и 10—100 А/мкФ;

существенно несинусоидальная форма напряжения (обычно трапецеидальная, рис. 1-4,*а*, *б*, «гребенчатая», рис. 1-4,*г*, или более сложные, а в ряде схем ТП — наличие на коммутирующем конденсаторе постоянной составляющей напряжения).

Эти особенности приводят к существенному повышению тепловыделения в конденсаторах по сравнению с синусоидальным напряжением той же амплитуды. Наличие постоянной составляющей напряжения накладывает ограничение при выборе конденсаторов из-за возможности электрохимического старения (см. § 2-4).

1-3. ДЕМПФИРУЮЩИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Демпфирующие конденсаторы совместно с резисторами служат для защиты полупроводниковых вентилей от коммутационных перенапряжений, возникающих в самом ТП при резком спаде тока в вентилях при их выключении из-за наличия индуктивностей цепей, а также в пи-

тающей ТП сети из-за коммутаций в различных нагрузках [1-2]. Одновременно демпфирующие конденсаторы способствуют уменьшению скорости изменения напряжения на закрытых тиристорах и тем самым предотвращают возможность самопроизвольного отпирания тиристоров [1-2, 1-3, 1-31, 1-32]. Демпфирующие *RC*-цепочки применяются также для динамического распределения напряжения на последовательно включенных вентилях

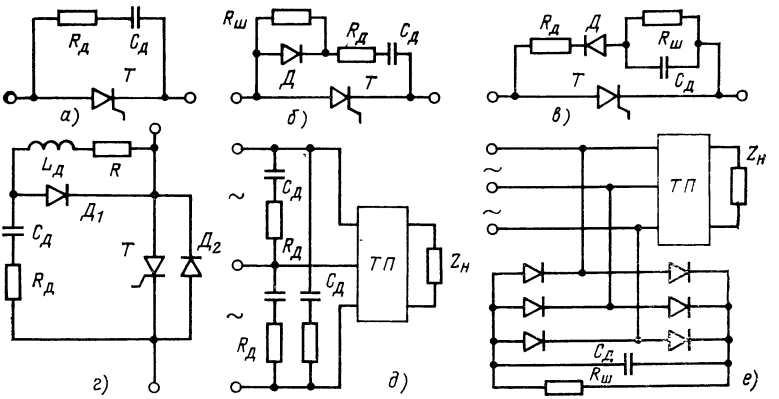


Рис. 1-7. Основные схемы включения демпфирующих конденсаторов.
а — простая демпфирующая *RC*-цепочка; *б* — демпфирующая цепочка с различными постоянными времени заряда и разряда [1-35]; *в* — демпфирующая *RC*-цепочка для защиты тиристора от обратных перенапряжений [1-34]; *г* — демпфирующая *RC*-цепочка с различным временем и характером зарядного и разрядного тока [1-36]; *д* — защита преобразователя от перенапряжений сети; *е* — вариант включения демпфирующей *RC*-цепочки через выпрямительный мостик [1-2].

[1-2, 1-31]. В последнем случае целесообразно применение нелинейных конденсаторов [1-33].

Основные схемы включения демпфирующих конденсаторов показаны на рис. 1-7,*а*—*е*. На рис. 1-8 показаны диаграммы тока и напряжения на запирающемся тиристоре при отсутствии демпфирующей цепочки и при ее включении, иллюстрирующие эффект подавления пиков коммутационных перенапряжений.

Емкость демпфирующей цепочки определяется зарядом, накопленным в тиристоре при протекании обратного тока, который зависит от тока перед коммутацией, а также допустимым перенапряжением. Значение емко-

сти для современных ТП составляет от нескольких единиц до сотых долей микрофарады [1-2, 1-3].

Недостатком простой демпфирующей RC-цепочки (рис. 1-7,*а*) является то, что в ряде случаев, когда волновое сопротивление контура коммутации мало, приходится выбирать значение демпфирующего сопротивления $R_д$ больше оптимального, так как при малом сопротивлении возможен выход из строя тиристора, вызванный большим разрядным током конденсатора $C_д$. Кроме того, разрядный ток конденсатора вызывает дополнительные потери в тиристоре и этим снижает его нагрузочную способность.

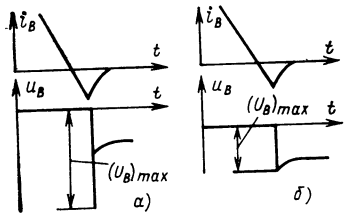


Рис. 1-8. Временные диаграммы тока и напряжения на тиристоре при его выключении.
а — демпфирующая RC-цепочка отсутствует; *б* — демпфирующая RC-цепочка включена.

В схемах демпфирующих цепей, изображенных на рис. 1-7,*б* [1-34], рис. 1-7,*в* [1-35, 1-37], а также на рис. 1-7,*г* [1-36], указанные недостатки в значительной мере преодолены путем создания контуров заряда и разряда демпфирующего конденсатора с различными сопротивлениями.

В схеме рис. 1-7,*в* сопротивление $R_д$ также существенно меньше шунтирующего сопротивления $R_ш$ и с целью предотвращения разряда демпфирующего конденсатора с большой амплитудой тока при отпирании тиристора включен диод $Д$. Резистор $R_ш$ служит для разряда конденсатора в интервале времени, когда к тиристору приложено прямое напряжение. В этой схеме демпфирующий конденсатор работает в более легком режиме, чем в остальных, так как к нему не прикладывается прямое напряжение тиристора T.

При выключении тиристора T через конденсатор $C_д$ и резистор $R_д$ протекает импульс тока, вследствие чего рассеивается энергия, накопленная в индуктивных элементах контура коммутации.

К демпфирующим RC-цепочкам, включаемым на входе ТП (рис. 1-7,*д*), приложено напряжение питающей сети синусоидальной или близкой к синусоидальной форме, в связи с чем конденсаторы этих цепочек работают при напряжении, близком к синусоидальному (на-

пряжение питающей сети на входе ТП несколько искажается за счет несинусоидальности тока потребляемого из сети ТП). При включении демпфирующей цепочки через мостовой выпрямитель (рис. 1-7,*е*) на конденсаторе $C_д$ возникает постоянное напряжение с переменной составляющей. Требования к такому конденсатору такие же, как и для других схем включения демпфирующих конденсаторов (см. табл. 1-1).

К демпфирующим *RC*-цепочкам, включаемым параллельно тиристорам и диодам силовой схемы ТП, приложено существенно несинусоидальное напряжение, характеризуемое большим разнообразием форм, зависящим как от схемы ТП и функций, выполняемых вентилями в ТП, так и от режима работы ТП.

Параметры и форма напряжения на вентилях ТП находятся путем анализа электромагнитных процессов в ТП, проводимого с помощью их математического или физического моделирования.

Некоторые типовые формы напряжения на вентилях ТП представлены на рис. 1-9,*а*—*е*. На этих же рисунках показаны токи, протекающие через демпфирующую цепочку и напряжение на конденсаторах $C_д$ [оно практически совпадает с напряжением на вентиле, на участках с малой крутизной $u(t)$ и показано пунктирными линиями на участках, где крутизна велика].

Характерной особенностью напряжения, приложенного к вентилям ТП, является наличие в кривой напряжения участков с нулевым напряжением (продолжительность этих участков равна длительности включенного состояния вентилей), а также резких скачков напряжения в обратном (при отсутствии обратных шунтирующих диодов) и прямом направлениях при включении данного вентиля, а также при коммутациях других вентилей в ТП [1-3, 1-8].

Поскольку постоянная времени демпфирующих *RC*-цепочек, равная $\tau_д = R_д C_д$, составляет в реальных схемах от единиц до десятков (в низкочастотных ТП — до сотен) микросекунд, то напряжение на конденсаторе демпфирующей цепочки при скачке напряжения на вентиле изменяется по закону, близкому к апериодическому[1], а в остальные интервалы времени оно практически

[1] Закон изменения напряжения и тока демпфирующего конденсатора определяется параметрами контура, в котором осуществляется демпфирование колебаний.

равно напряжению на вентиле, т. е. повторяет его по форме и значению (рис. 1-9,*а—е*).

Для конденсаторов демпфирующих цепочек по схеме рис. 1-7,*б—г* вследствие разных постоянных времени заряда и разряда ($R_ш \gg R_д$) форма напряжения несколько отлична от формы напряжения в схеме рис. 1-7,*а*.

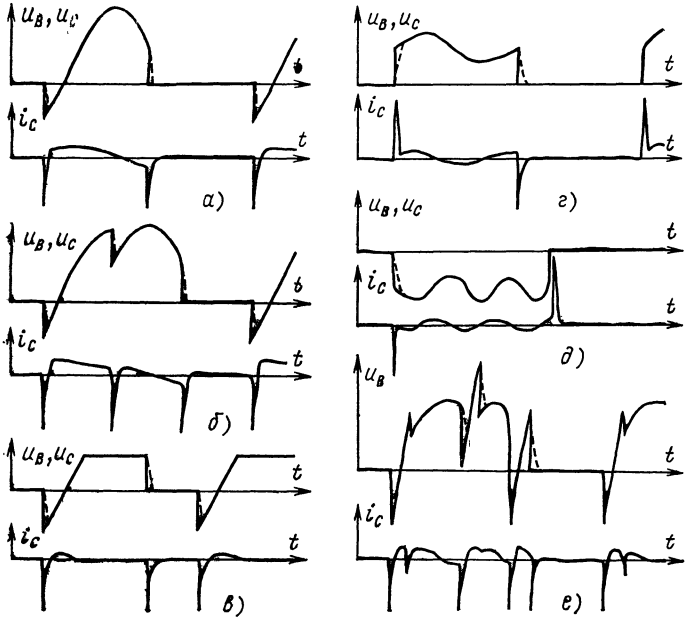


Рис. 1-9. Диаграммы напряжения на вентилях ТП, на конденсаторе простой демпфирующей цепочки и ток через конденсатор.

а — однофазные схемы выпрямителей или инверторов; *б* — трехфазные мостовые схемы выпрямителей или инверторов; *в* — дважды трехфазная схема ТП; *г* — резонансный инвертор; *д* — многоячейковая схема высокочастотного ТП; *е* — схема мостового ТП с двумя коммутирующими тиристорами и тремя коммутирующими конденсаторами.

К вентилям ТП, находящимся в закрытом состоянии, прикладывается либо напряжение питающей сети (в ТП с естественной коммутацией вентилей), либо напряжение на коммутирующем конденсаторе (или сумма напряжений на коммутирующем конденсаторе и выходного или входного напряжения в ТП с принудительной коммутацией вентилей) [1-3, 1-4, 1-13]. Из анализа установившихся электромагнитных процессов и нагрузочных характеристик можно определить зависимости формы и

пиковых значений напряжения на вентилях от режима работы ТП [1-3].

Пиковые значения напряжения на вентилях ТП с естественной коммутацией определяются амплитудой напряжения питающей сети. В ТП с принудительной коммутацией вентилей с ограниченными напряжениями на коммутирующих конденсаторах оно равно напряжению питания[1] (в автономных инверторах напряжения, импульсных регуляторах постоянного тока, вентильных источниках реактивной мощности) или близко к нему, либо достаточно сложно зависит от параметров и режима работы ТП при переменном уровне напряжения на коммутирующих конденсаторах.

Частота повторения напряжения на демпфирующих конденсаторах равна частоте включения вентилей ТП и равна или кратна частоте входного или выходного напряжения ТП.

В зависимости от частоты повторения применяется та или иная схема включения демпфирующего конденсатора (рис. 1-7,*а—е*). Например, в низкочастотных и среднечастотных ТП могут применяться схемы демпфирования, приведенные на рис. 1-7,*а* тогда как при частотах выше нескольких тысяч герц в [1-36] рекомендуется применение схемы, изображенной на рис. 1-7,*г* которая обеспечивает быстрый разряд демпфирующего конденсатора. Параметры цепи разряда $C_д R_д$ выбираются из условия обеспечения критического или близкого к нему апериодического режима разряда. Схема рис. 1-7,*г* защищает тиристор T только от пиков перенапряжений в прямом направлении и снижает скорость нарастания прямого напряжения.

Поскольку напряжение на демпфирующих конденсаторах цепочек в схемах рис. 1-7,*а—е* практически такое же как напряжение на вентилях, то в переходных, нормальных и аварийных режимах перегрузки по напряжению этих конденсаторов примерно такие же, как у вентилей и могут быть в полтора — два раза больше, чем в стационарном режиме, что необходимо принимать во внимание при выборе демпфирующих конденсаторов.

Таким образом, для электрического режима работы демпфирующих конденсаторов также характерны существенно несинусоидальная форма напряжения; им-

[1] Амплитуда напряжения на коммутирующих конденсаторах в реальных схемах ТП на 20—30% выше напряжения питания.

пульсный характер тока значительной амплитуды, повышенной частоты повторения и малой продолжительности (амплитуда импульсного тока может достигать десятков и даже сотен ампер на микрофараду при длительности в десятки — сотни микросекунд); наличие постоянной составляющей напряжения. Расчеты показывают, что удельные токовые нагрузки на демпфирующие конденсаторы по действующему значению тока могут быть также значительными (от единиц до десятков ампер на микрофараду).

1-4. ФИЛЬТРОВЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Силовые полупроводниковые преобразовательные устройства являются генераторами основной и высших гармоник напряжения и тока [1-3, 1-8, 1-13]. Так, выпрямители и инверторы тока генерируют гармоники тока (первые — в питающую сеть, вторые — в цепь нагрузки), а инверторы напряжения и непосредственные преобразователи частоты могут рассматриваться как генераторы гармоник напряжения в цепи нагрузки.

Вместе с тем многим потребителям электрической энергии, питающимся от ТП (обычно на частотах 50, 400 или 1000 Гц), необходимо напряжение, достаточно близкое по форме к синусоидальному (ГОСТ допускает коэффициент гармоник не более 5%, а в некоторых специальных случаях 3% и даже ниже [1-17—1-19]).

Известно довольно большое количество способов улучшения гармонического состава токов и напряжений ТП как схемным путем, так и организацией управления ими по специальным законам, однако в ряде случаев все же требуется дополнительная фильтрация напряжения с помощью пассивных электрических фильтров.

В качестве входных фильтров ТП могут быть применены фильтры нижних частот, при этом резонансная частота контура сеть — батарея должна быть ниже частоты, следующей за основной гармоникой спектра тока, потребляемого ТП.

Наиболее широкое применение для указанных выше целей находят резонансные режекторные фильтры, включаемые на сетевое напряжение [1-38].

Особенностью работы конденсаторов в таких фильтрах является возможность их перегрузки как за счет сетевого напряжения [согласно выражению $U=$

$=U_c/(1-\omega^2 L_ф C_ф)$, где U_c — напряжение сети, $L_ф$, $C_ф$ — индуктивность и емкость звена фильтра; ω — угловая частота напряжения сети, напряжение основной частоты на конденсаторе возрастает вследствие частичной компенсации на частоте сети емкостного сопротивления конденсатора индуктивным сопротивлением дросселя], так и за счет токов высших гармоник [1-39]. Дополнительные перегрузки конденсаторов фильтров возникают из-за положительных отклонений сетевого напряжения от номинального значения.

Анализ условий работы конденсаторов входных фильтров ТП (выпрямителей, преобразователей частоты с непосредственной связью) сопряжен с определенными трудностями, поскольку режим их работы зависит не только от режима работы ТП, но и от параметров питающей сети, представляющей систему с распределенными параметрами и сосредоточенными источниками токов и э. д. с. основной и высших гармоник [1-38].

На рис. 1-10,*а*, *б* изображены схемы резонансных фильтров, служащих для улучшения гармонического состава сетевого напряжения. Емкость батареи C_1 на рис. 1-10,*а* [1-40] выбирается из условия обеспечения ее резонанса с остальной частью фильтра на 5-й гармонике, а C_2 — на 7-й. Емкость компенсирующей батареи C_3 выбирается из условия, чтобы резонансная частота контура сеть — батарея C_3 была близка к частоте 7-й гармоники ТП.

На рис. 1-10,*б* показаны резонансные фильтры с раздельными звеньями [1-38, 1-41]. Эти звенья настраиваются в резонанс на частотах высших гармоник ТП. Резисторы в схемах фильтров рис. 1-10,*а*, *б* обеспечивают необходимую ширину полосы пропускания фильтров. Возможны также другие схемы включения резонансных фильтров — резистивно-мостовые, с общими резисторами [1-38, 1-41]. В настоящее время фильтры на входе ТП применяются в основном в высоковольтных сетях.

Однако имеющаяся тенденция к увеличению доли выпрямительной нагрузки также и в сетях низкого напряжения приводит к необходимости разработки комплексных средств компенсации мощности искажения и реактивной мощности [1-39].

Особенностями режимов работы конденсаторов сетевых фильтров ТП являются: повышенное напряжение

основной (сетевой) гармоники; несинусоидальная форма напряжений и особенно токов; подверженность перегрузкам по напряжению и току из-за переходных процессов в питающей сети.

Для подавления радиопомех, генерируемых тиристорными схемами, в составе заграждающих фильтров, включаемых в силовые цепи питания, используются специальные малоиндуктивные проходные и защитные

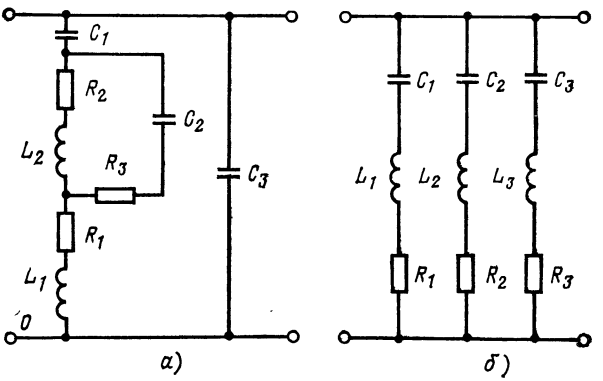


Рис. 1-10. Схемы резонансных фильтров, устанавливаемых на входе ТП выпрямителей, непосредственных преобразователей частоты для компенсации реактивной мощности и уменьшения несинусоидальности тока.

конденсаторы (К75П-5, К75П-4). Установка выходных фильтров необходима в первую очередь в однофазных ТП, поскольку в них появляется достаточно мощная 3-я гармоника, а также в инверторах напряжения, формирующих на выходе ступенчатопрямоугольное напряжение [1-3, 1-42, 1-43].

Фильтры высших гармоник должны обеспечивать снижение коэффициента гармоник до допустимого значения при условии обеспечения некоторых других технических и технико-экономических требований, таких как жесткость внешней характеристики, минимум нагрузки на ТП, минимальные массо-габаритные характеристики, потери энергии и т. д. [1-1, 1-3, 1-42—1-46].

Расчет силовых фильтров ТП имеет свои отличительные особенности, связанные с комплексностью нагрузки и ее изменениями как по модулю, так и по фазовому углу [1-44, 1-46]. В результате выбора и расчета фильтров становятся известны: конфигурация фильтра (схе-

ма), значения его элементов ($L_ф$ и $C_ф$), гармонический состав токов и напряжений на элементах фильтра. Уточненный расчет фильтра, учитывающий влияние активных сопротивлений элементов фильтра, их нелинейность, влияние расстройки фильтра на его электрические характеристики, позволяет сформулировать требования к добротности элементов и стабильности их параметров [1-3].

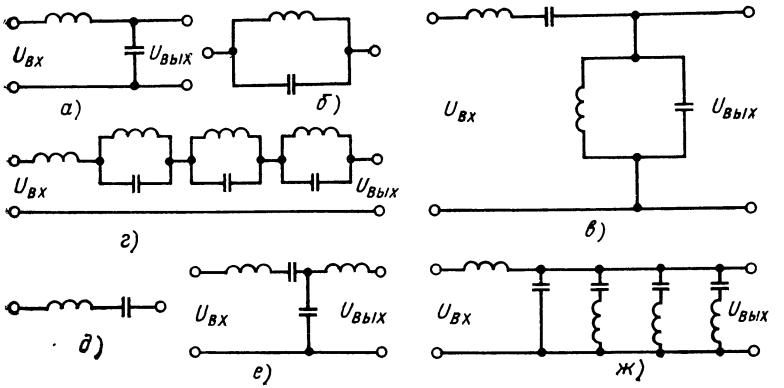


Рис. 1-11. Схемы выходных фильтров ТП.

Известен ряд схем силовых фильтров, пригодных для применения в ТП [1-1, 1-2, 1-3]. В целом эти фильтры можно разделить на две категории — широкополосные (фильтры нижних частот) и узкополосные (резонансные) (рис. 1-11,*а*—*ж*). Фильтры могут быть однозвенные, двухзвенные и многозвенные.

Основной особенностью работы конденсаторов в фильтрах переменного тока является несинусоидальность напряжения на них. Так, на конденсаторе широкополосного фильтра (рис. 1-11,*а*) напряжение содержит основную гармонику напряжения (обычно близкую к выходному напряжению ТП) и быстрозатухающий спектр высших гармоник. Коэффициенты гармоник напряжения на этом конденсаторе и нагрузке равны и составляют обычно 5% и менее, что является допустимым практически для всех конденсаторов переменного тока.

LC-контур (рис. 1-11,*б*) обычно включается параллельно нагрузке (рис. 1-11,*в*), и его резонансная частота

равна частоте основной гармоники выходного напряжения ТП. Для подавления высших гармоник напряжения используется последовательное включение ряда контуров, настроенных на частоты гармоник (рис. 1-11,*г*) [1-45]. Такое включение используется только в том случае, когда ТП является генератором гармоник напряжения (непосредственные преобразователи частоты, инверторы напряжения) [1-47].

LC-контур (рис. 1-11,*д*) также может быть применен в последовательном и параллельном включениях (рис. 1-11,*е*, *ж*). В первом случае его резонансная частота выбирается равной частоте основной гармоники выходного тока ТП, а во втором — частотам высших гармоник. Параллельное включение используется тогда, когда ТП является генератором гармоник тока (инвертор тока) [1-47].

Применение того или иного фильтра и выбор его параметров зависят от ряда факторов: характеристики нагрузки, допустимого коэффициента гармоник и жесткости выходной характеристики ТП [1-43].

Амплитуда основной гармоники напряжения на конденсаторе зависит от схемы фильтра, волнового сопротивления и резонансной частоты *LC*-контуров. Так, на конденсаторах последовательных *LC*-контуров фильтра на рис. 1-11,*ж* напряжения основной частоты больше, чем на нагрузке, за счет частичной компенсации емкостного сопротивления индуктивным

$$U_1 = U_н/(1 - \Omega^2 L_ф C_ф), \qquad (1\text{-}4)$$

где U_1, $U_н$ — соответственно напряжение основной частоты на конденсаторе и на нагрузке; Ω — угловая частота основной (первой) гармоники выходного напряжения ТП.

При последовательном включении *LC*-контура (рис. 1-11,*д*) на выходе ТП через его конденсатор протекает полный ток нагрузки. Поскольку контур работает в режиме резонанса напряжений на частоте основной гармоники, то напряжение определяется волновым сопротивлением этого контура

$$U_1 = \rho I_1,$$

где $\rho = \sqrt{L_ф/C_ф}$ — волновое сопротивление контура; I_1 — основная (первая) гармоника тока нагрузки.

Высшие гармоники напряжения на конденсаторе такого фильтра быстро затухают в соответствии с выражением

$$U_к = I_к / k\Omega C,$$

где $U_к$ — напряжение k-й гармоники на конденсаторе; $I_к$ — ток k-й гармоники на выходе ТП.

При последовательном включении параллельных LC-контуров на выходе ТП (рис. 1-11,*г*) напряжение основной гармоники на их конденсаторах равно:

$$U_1 = \frac{I_1 \Omega L_ф}{1 - \Omega^2 L_ф C_ф}.$$

Обычно из соображений получения требуемой жесткости внешних характеристик ТП при приемлемых масс-габаритных характеристиках фильтра $U_1 = 10 \div 20\%$ выходного напряжения ТП [1-3]. Напряжение резонансной гармоники на конденсаторе близко к напряжению этой гармоники в спектре выходного напряжения ТП.

Для эффективного подавления высших гармоник обычно применяется от одного до трех звеньев фильтров, настроенных на частоты наиболее мощных гармоник канонического порядка — 3-ю (в однофазных ТП), 5-ю, 7-ю и т. д. Кроме основной гармоники, на конденсаторах резонансных контуров выделяется напряжение той высшей гармоники, на которую настроен контур.

Осциллограммы тока и напряжения на конденсаторах резонансных фильтров 5-й и 7-й гармоник фазокомпенсирующего устройства [1-39] приведены на рис. 1-12. Из осциллограмм видно, что кроме тока 1-й и резонансных гармоник имеются небольшие составляющие высших и низших гармоник.

Необходимо отметить, что форма и амплитуда напряжения на конденсаторах резонансных фильтров меняются в зависимости от режима работы ТП, в первую очередь от параметров нагрузки, поскольку от модуля, фазового угла, схемы и характера нагрузки зависят амплитуды и фазы гармоник тока и напряжения, которые генерирует ТП, а также гармоник в цепи нагрузки.

При изменении нагрузки изменяются не только модули напряжений на конденсаторах фильтров, но и сдвиг фаз между ними. Необходимо также отметить, что на гармонический состав токов и напряжений на выходе ТП оказывают влияние также и сами фильтры, так как включение фильтра приводит к изменению эквивалентной нагрузки ТП.

Кроме нормальных технологических нагрузок в процессе эксплуатации конденсаторы фильтров ТП подвергаются различным перегрузкам при авариях как в самом ТП, так и в цепях нагрузки. Продолжительность аварийного состояния зависит от выдержек времени срабатывания защиты ТП или в цепях нагрузки. При коротких замыканиях в цепях нагрузки на последовательных

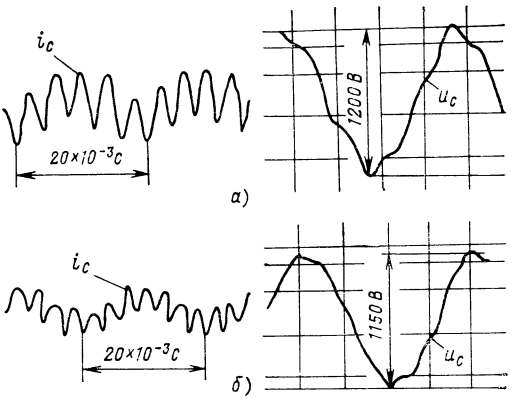


Рис. 1-12. Осциллограммы тока и напряжения конденсатора резонансного фильтра 5-й (*а*) и 7-й (*б*) гармоник при U_c=380 В.

элементах фильтров напряжение возрастает пропорционально току короткого замыкания и зависит от кратности перегрузки по току. В некоторых ТП при коротких замыканиях система управления автоматически увеличивает частоту выходного тока с тем, чтобы увеличить падения напряжения на последовательных индуктивных элементах фильтров [1-23, 1-24].

1-5. КОМПЕНСИРУЮЩИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Компенсирующие конденсаторы предназначены для поперечной, а в ряде случаев и продольной компенсации (частичной, полной или даже перекомпенсации) реактивной мощности ТП или нагрузки[1]. В автономных

[1] Для обеспечения устойчивой работы автономного параллельного инвертора тока [1-3, 1-13], в частности, необходима полная компенсация реактивной мощности нагрузки и реактивной мощности инвертора, т. е. необходим перекомпенсированный режим.

инверторах тока с принудительной коммутацией параллельные конденсаторы, частично или полностью компенсирующие реактивную мощность нагрузки, необходимы для улучшения технико-экономических характеристик инверторов, так как при отсутствии параллельных конденсаторов в них существенно повышаются напряжения на всех элементах схемы [1-3]. В ряде схем ТП компенсирующие конденсаторы выполняют одновременно функции фильтрации высших гармоник и коммутации вентилей. Режимы работы компенсирующих конденсаторов, включенных на стороне питающей сети (50 Гц) и работающих совместно с ТП, по существу близки к режимам работы силовых косинусных конденсаторов [П-3].

Компенсирующие конденсаторы, включаемые на выходе автономных ТП, работают при напряжении, параметры которого (частота, амплитуда, коэффициент гармоник) зависят от назначения ТП, его мощности и требований, предъявляемых к нему со стороны потребителей. В стабилизированных ТП напряжение на компенсирующих конденсаторах близко к синусоидальному (коэффициент гармоник обычно не более 5%) и колеблется в достаточно узких пределах, не превышающих нескольких процентов.

Однако в переходных режимах при сбросах нагрузки возможны кратковременные (несколько периодов) повышения напряжения на несколько десятков процентов [1-23, 1-24]. В аварийных режимах возможны перегрузки по напряжению до двукратного значения, а также двойные и даже тройные кратковременные (0,1—1 с) перегрузки по действующему току, обусловленные изменением частоты работы ТП при селективном отключении линии нагрузки, на которой произошло короткое замыкание [1-23, 1-24].

Мощность компенсирующих конденсаторов ТП, содержащих параллельный инвертор тока, при низком коэффициенте мощности нагрузки и большом диапазоне ее изменения может в несколько раз превышать мощность нагрузки, поскольку необходима компенсация как реактивной мощности нагрузки, так и реактивной мощности инвертора [1-3, 1-19, 1-47].

При компенсации реактивной мощности регулируемых выпрямительных установок реактивная мощность конденсаторов, необходимая для повышения коэффициента мощности до допустимого значения, также зависит

от диапазона регулирования и достаточно велика, что обусловливает экономическую целесообразность применения компенсационных схем выпрямителей.

Широко применяются конденсаторы для продольной и поперечной компенсации в бесконтактных системах электроснабжения на повышенной частоте, а также в электротермических установках, питание которых в настоящее время осуществляется от ТП на частотах от сотен герц до десятков тысяч герц [1-22]. Напряжение

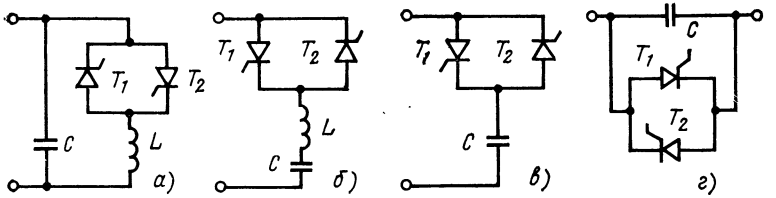


Рис. 1-13. Основные схемы компенсации реактивной мощности, регулируемой с помощью тиристоров.

на конденсаторах таких установок практически синусоидально, однако величина напряжения и частота (например, в электротермических установках) изменяются в довольно широких пределах [1-22].

К рассматриваемой группе конденсаторов относятся также компенсирующие конденсаторы источников реактивной мощности (ИРМ), регулируемых с помощью ТП [1-48—1-50].

На рис. 1-13,*а—г* показаны основные схемы регулируемых ИРМ, содержащих компенсирующие конденсаторы.

Схема рис. 1-13,*а* нашла широкое применение для регулирования в стабилизированных автономных инверторах [1-18, 1-19]. В данной схеме регулируется реактивная мощность реактора с помощью изменения угла управления тиристоров T_1 и T_2. Напряжение на конденсаторе C практически синусоидальной формы.

Основные достоинства схемы — это ее простота и возможность получения от ИРМ как положительной, так и отрицательной реактивной мощности при высоком быстродействии. Однако из-за значительной установленной мощности реакторов область ее применения в определенной мере ограничена.

Схема, приведенная на рис. 1-13,*б*, диаграмма токов и напряжений на конденсаторе C которой изображена на рис. 1-14, позволяет с помощью тиристоров T_1 и T_2 регулировать емкостный ток батареи [1-48]. Форма напряжения на конденсаторах такого ИРМ зависит от его режима работы (угла управления α) и изменяется от синусоидальной ($\alpha=0$) до симметричной трапецеидальной (рис. 1-4). При регулировании изменяется также амплитуда напряжения.

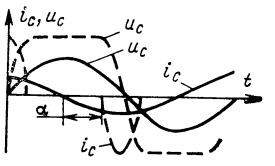


Рис. 1-14. Диаграмма тока и напряжения конденсатора ИРМ, показанного на рис. 1-13,*б*.

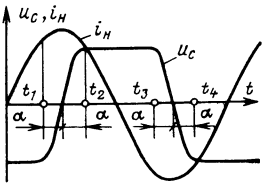
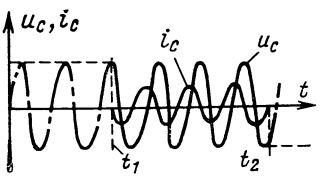


Рис. 1-15. Диаграмма работы устройства продольной компенсации ИРМ по схеме рис. 1-13,*г*.

Подобная же форма напряжения на конденсаторе имеет место в ИРМ продольной компенсации (рис. 1-13,*г*). В этой схеме полностью управляемая ключевая схема с двусторонней проводимостью на полупроводниковых вентилях выключается в момент времени t_1 и t_3 и вновь включается в момент времени t_2 и t_4, благодаря чему ток нагрузки в интервал времени t_1—t_2 и t_3—t_4 протекает

Рис. 1-16. Диаграмма работы устройства поперечной компенсации ИРМ по схеме рис. 1-13,*в*.



через конденсатор, перезаряжая его (рис. 1-15). Регулированием угла управления α от 0 до $\pi/2$ достигается регулирование эквивалентной (по основной гармонике) емкости ИРМ от номинального значения C до бесконечности, т. е. регулирование реактивной мощности от $Q_н$ до нуля [1-51].

Для компенсации реактивной мощности переменных реактивных нагрузок применяется также схема, изображенная на рис. 1-13,*в*, представляющая бесконтактный вариант ступенчатого регулирования реактивной мощно-

сти [1-49]. Включение тиристоров T_1 и T_2 в этой схеме происходит в моменты равенства по модулю и знаку напряжения сети и на конденсаторе, что обеспечивает бестоковую коммутацию. Коммутация тиристоров T_1 и T_2 — естественная, и в зависимости от полярности сетевого напряжения при их выключении на конденсаторе остается постоянное напряжение (на рис. 1-16 оно показано штриховой линией). В интервал времени t_1—t_2, когда на тиристоры T_1 и T_2 подаются импульсы управления (в моменты перехода тока через ноль), напряже-

Конденсаторы	Общие требования	Специфические	
		Емкость, мкФ	Разброс емкости, %
Коммутирующие	Высокая надежность (особенно в высоковольтных установках гарантированного питания ответственных потребителей)	1,0—1000,0 1,0—1000,0 1,0—100,0	±5 при последовательном соединении ±10 ÷ ±20 при параллельном соединении в батареи
Демпфирующие	Должны допускать кратковременные перегрузки по напряжению (до 1,5—2 $U_н$) Должны допускать работу при нагрузках, меняющихся в широких пределах	0,01—1,0 (2,0—10,0)	±10 ÷ ±20 в одиночных цепочках ±3 ÷ ±5 в вентильных блоках при последовательном соединении вентилей
Фильтровые	Сроки службы и ресурсы должны быть такими же, как у силовых полупроводниковых вентилей, или большими	0,1—10,0 (до 100,0)	±1 ÷ ±2 (до ±5)
Компенсирующие	Малые потери энергии Малые габариты и масса Должны допускать монтаж в любом положении	1,0—1000,0 (для ТП малой и средней мощностей)	±10 ÷ ±20 (±5)

ние и ток конденсаторов практически синусоидальны. Таким образом, конденсаторы в такой схеме работают в циклическом режиме.

1-6. ТРЕБОВАНИЯ К КОНДЕНСАТОРАМ ДЛЯ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Требования к конденсаторам зависят от функционального назначения конденсаторов и самих преобразовательных устройств. Каждая из функциональных групп конденсаторов имеет свои специфические особенности

Таблица 1-1

Амплитуда напряжения, кВ	Частота повторения, Гц	Требования к параметрам конденсаторов
0,25—3,0 (3,0—10,0)	0—50	Малая температурно-частотная зависимость емкости и tg δ
0,1—1,0	50—10 000	Высокая нагрузочная способность по действующему и амплитудному токам
0,15—1,0	1000—40 000	Высокое значение сопротивления утечки и коэффициента абсорбции (для низкочастотных ТП)
		В некоторых случаях должны допускать длительную работу при наличии постоянной составляющей напряжения
0,1—1,0	0—50	Минимальные последовательное активное сопротивление и индуктивность
(1,5—5,0)	50—10 000	Высокая электрическая прочность
		Высокая нагрузочная способность по амплитудному и действующему токам
		Должны допускать длительную работу при наличии постоянной составляющей напряжения
0,15—1,0 (до 10,0)	50—100 000	Температурная и временная стабильность емкости и tg δ
		Должны допускать длительную повышенную нагрузку по действующему току
0,22—1,0	50—40 000	Должны допускать длительные перегрузки по активной мощности до 30%
		Должны допускать длительную перегрузку по напряжению до 10—20%

электрического режима работы, а также общие для всех конденсаторов конкретного ТП особенности условий работы, обусловленные назначением ТП, режимами его работы и другими факторами.

В табл. 1-1 приведены общие для всех групп конденсаторов ТП специфические требования, вытекающие из условий их работы и сформулированные на основании обработки литературных данных и ответов на опросные листы.

Кроме этих требований, к конденсаторам ТП предъявляются требования в части внешних воздействий — климатических (температурный диапазон, давление, влажность, загрязненность и т. д.), механических воздействий (удары, вибрации, ускорения и т. д.), а также особые требования, в частности, по пожароопасности и др. Так, конденсаторы ТП, применяемых на транспортных средствах, должны обладать повышенной стойкостью к вибрациям, ударам, ускорениям[1].

В зависимости от назначения ТП, его режима работы предъявляются определенные требования к показателям надежности конденсаторов (долговечности, ресурсу, сроку службы, интенсивности отказов и т. д.). Очевидно, что там, где отказ ТП может привести к большому материальному ущербу или представит опасность для жизни людей, к самому ТП и соответственно к его элементам (в том числе к конденсаторам) предъявляются повышенные требования к безотказности. Это относится к демпфирующим конденсаторам высоковольтных ТП, содержащим большое количество последовательно включенных вентилей.

Кроме перечисленных требований, к конденсаторам ТП еще предъявляются требования минимальных габаритов, поскольку объемы, занимаемые конденсаторами в современных ТП, составляют до нескольких десятков процентов общего объема ТП, а также требования снижения стоимости конденсаторов.

---

[1] В ряде случаев действие механических нагрузок (вибраций и ударов) на конденсаторы ТП транспортных средств может быть ослаблено путем специального монтажа конденсаторов на амортизирующих прокладках и т. д.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КОНДЕНСАТОРАХ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ КОНДЕНСАТОРОВ

2-1. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКА

Физические, химические и другие процессы в конденсаторах связаны с энергией электрического поля в диэлектрике, энергией магнитного поля в конденсаторе — с их значениями, изменениями во времени, преобразованиями этих видов энергий в механическую энергию, тепловую и т. д.

В области слабых полей не происходит нарушения внутренних связей в веществе диэлектрика и других элементах конструкции конденсатора. В этой области основными являются поляризация, тепловые и химические процессы.

При сильных полях внутренние связи в веществе разрушаются под действием сил электрического и магнитных полей, а также в результате возникновения значительного нагрева элементов конструкции конденсатора. В области сильных полей, кроме поляризационных и тепловых процессов, в диэлектрике возникают частичные разряды (ионизационные процессы, неполные пробои диэлектрика), полный пробой в конструкции, механические и ряд других физических процессов (кавитация, резонансные явления и т. д.) [П-1, П-3, П-4, 2-1, 2-2].

Главные процессы, ответственные за работоспособность и долговечность конденсатора, развиваются в его диэлектрике, обкладках и контактных узлах.

Конденсаторы с достаточно большим сроком службы (тысячи — сотни тысяч часов) обычно эксплуатируются в режимах, которые характеризуют электрические, магнитные, тепловые и другие поля как слабые, не приводящие к быстрому износу конденсаторов и выходу их из строя. Существует, однако, ряд режимов, определяемых назначением и режимом работы устройства, содержащего конденсаторы, в которых срок службы конденсатора резко ограничен (секунды — часы).

Например, известно, что в ряде случаев импульсные конденсаторы проектируются на режим со сроком служ-

бы, соответствующим нескольким десяткам — сотням разрядов [2-1]. При таких режимах в конденсаторах возникают сильные поля, приводящие к их быстрому износу.

При отсутствии электрического напряжения на зажимах конденсатора любой его достаточно малый объем является электрически нейтральным. Это обусловлено тем, что в неполярных веществах молекулы и атомы имеют совпадающие в пространстве центры положительных и отрицательных зарядов. Полярные вещества, имеющие молекулы или части молекул (группы, радикалы), у которых центры отрицательных и положительных зарядов не совпадают, т. е. образуют диполи, также имеют электрический момент, равный нулю, вследствие хаотического теплового движения (колебания, вращения) и случайной ориентации диполей отдельных молекул [2-2].

Если к обкладкам конденсатора подвести постоянное напряжение, то в диэлектрике произойдет смещение электрических зарядов на ограниченные расстояния. При этом на поверхности диэлектрика и в его объеме произойдет смещение связанных (несвободных) электрических зарядов. Полярные молекулы или их отдельные части получат некоторую ориентацию в направлении поля, смещение ионов относительно центров равновесия приобретает также преимущественное направление.

В результате указанных явлений (смещения зарядов на ограниченные расстояния, преимущественной ориентации дипольных молекул или дипольных частей молекул), а также движения на ограниченные расстояния свободных зарядов или их скоплений (при этом они могут закрепляться в дефектах структуры диэлектрика — неоднородностях, дислокациях и т. д.) электрический момент элементарного объема диэлектрика, усредненный по времени, становится отличным от нуля, т. е. диэлектрик поляризуется.

Степень поляризации характеризуется вектором поляризации

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta \vec{M}}{\Delta V}, \qquad (2\text{-}1)$$

где $\Delta \vec{M}$ — электрический момент объема диэлектрика ΔV [2-2].

Упрощенная макроскопическая модель поляризации диэлектрика показана на рис. 2-1.

В результате поляризации диэлектрика на его поверхности у обкладок появляются связанные заряды (на рис. 2-1 они обозначены в кружочках). Поле в конденсаторе создается полем свободных зарядов на обкладках и полем связанных зарядов, направленными навстречу друг другу.

Таким образом, из-за поляризации происходит уменьшение напряженности поля в пространстве, заполненном диэлектриком, поскольку связанные заряды частично «нейтрализуют» поле свободных зарядов на обкладках.

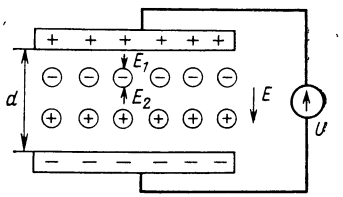


Рис. 2-1. К пояснению упрощенной макроскопической модели поляризации.

При отсутствии в промежутке между обкладками диэлектрика (т. е. при помещении обкладок конденсатора в вакуум) поле создается только свободными зарядами на обкладках. Связь между поверхностной плотностью зарядов и напряженностью электрического поля «вакуумного» конденсатора выражается следующим соотношением [2-2]:

$$\sigma_0 = \varepsilon_0 E, \qquad (2\text{-}2)$$

где ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума.

Если в пространство между обкладками, отключенными от источника и имеющими поверхностную плотность зарядов σ_0, внести диэлектрик, то в результате поляризации последнего напряженность поля снизится до значения $E\varepsilon_0/\varepsilon_a$, где ε_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, что приведет к снижению напряжения на обкладках конденсатора в $\varepsilon_a/\varepsilon_0$ раз, поскольку $U = Ed$, где d — толщина диэлектрика (рис. 2-1).

Абсолютную диэлектрическую проницаемость можно представить как произведение

$$\varepsilon_a = \varepsilon\varepsilon_0. \qquad (2\text{-}3)$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, показывающая, во сколько раз емкость конденсатора с диэлектриком больше емкости вакуумного конденсатора при прочих равных условиях.

Очевидно, чем выше относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, тем сильнее он поляризуется в электрическом поле (т. е. образует больше связанных зарядов).

Весьма важным является представление о том, по какому закону во времени устанавливается поляризация. При всех видах поляризации внешняя сила (сила локального электрического поля), стремящаяся сместить заряды в направлении поля, уравновешивается упругой силой взаимодействия между зарядами, силой вязкого взаимодействия частиц (силой трения) и силой инерции частиц.

Это упрощенное представление о взаимодействиях в диэлектрике, которые в действительности имеют существенно более сложный характер, поскольку реальные процессы взаимодействий подчиняются законам квантовой механики, приводит к дифференциальному уравнению второго порядка, описывающего движение частиц [2-3]:

$$a_i \frac{dP_i}{dt^2} + b_i \frac{dP_i}{dt} + c_i P_i = E, \qquad (2\text{-}4)$$

где P_i — модуль вектора поляризации, пропорциональный смещению частиц; E — напряженность поля, которой пропорциональна внешняя сила, действующая на частицы; a_i, b_i, c_i — постоянные коэффициенты, зависящие от упругих и вязких сил взаимодействия.

Уравнение (2-4) записано для линейного диэлектрика, в котором смещение зарядов пропорционально силе вызывающей это смещение (или напряженности поля). Соотношения между коэффициентами c_i, a_i и b_i, c_i определяют соответственно собственную частоту колебаний частиц и постоянную времени установления поляризации частиц (см. ниже).

В связи с малым временем установления поляризации электронного смещения, упруго-ионной и упруго-дипольной поляризации эти виды поляризации, устанавливающиеся за время, меньшее 10^{-12} с, считаются практически безынерционными [2-2].

Релаксационные виды поляризации, устанавливающиеся в течение сравнительно большого промежутка времени, принято называть инерционной поляризацией. Границей инерционной поляризации считается время установления большее 10^{-10} с [2-2]. Используя принцип суперпозиции, можно считать, что релаксационные виды поляризации устанавливаются по закону

$$P = \sum_{i=1}^{i_{max}} P_y (1 - e^{-t/\tau_i}),$$

где P_y — установившееся значение поляризации; τ_i — постоянные времени установления поляризации; i_{max} — число различных видов поляризации.

Кроме связанных зарядов, в реальных диэлектриках имеются свободные заряды (обычно ионы), которые,

двигаясь по объему материала под действием сил электрического поля, могут попадать в «ловушки» — закрепляться на дефектах, но могут и достигать обкладок, образуя ток утечки.

Движение связанных зарядов образует ток поляризации, входящий составной частью в ток смещения, второй составляющей которого является ток смещения в вакууме.

По мере достижения стационарного состояния поляризаций различных видов ток смещения спадает, достигая нулевого значения после завершения всех видов поляризации. В этом случае ток во внешней цепи конденсатора равен его току утечки.

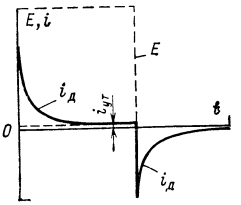


Рис. 2-2. Зависимость тока через диэлектрик от времени при ступенчатом воздействии и снятии электрического поля.

Если скачком снять внешнее поле (закоротить обкладки заряженного конденсатора), то в результате исчезновения сил, поддерживающих смещение зарядов, ориентацию диполей и т. д., под действием упругих сил взаимодействий зарядов, а также в результате теплового движения молекул, ионов происходят процессы, обратные поляризации.

На рис. 2-2 показаны токи, возникающие при поляризации и деполяризации диэлектрика. Основным процессом, сопровождающим поляризацию, имеющим исключительно важное значение при работе конденсаторов на переменном напряжении и особенно в импульсном режиме, является потеря энергии. Поскольку поляризация диэлектрика протекает при наличии сил «вязкого трения», обусловленных взаимодействиями частиц, происходит преобразование части энергии внешнего источника в теплоту, рассеиваемую в объеме диэлектрика.

При изменении электрического поля в диэлектрике возникает переходный процесс установления поляризации, сопровождающийся протеканием тока смещения и выделением теплоты[1]. Используя принцип суперпозиции,

[1] Потери энергии в диэлектрике возникают также в результате движения свободных зарядов, т. е. вследствие протекания через него тока утечки, однако они при невысоких температурах незначительны.

можно найти изменение поляризации во времени при сложных законах изменения напряженности [2-2].

Рассмотрим диэлектрик, находящийся в переменном электрическом поле [2-2, 2-3]. При синусоидальном изменении напряженности E во времени с частотой ω для комплексных значений справедливо

$$\dot{P}_i(c_i+j\omega b_i-\omega^2 a_i)=\dot{E}. \tag{2-5}$$

Если считать, что различные виды поляризации протекают независимо друг от друга, то

$$\dot{P}=\Sigma\dot{P}_i=\dot{E}_i\sum_{i=1}^{i_{max}}\frac{1}{c_i+j\omega b_i-\omega^2 a_i}. \tag{2-6}$$

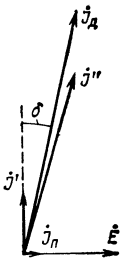


Рис. 2-3. Векторная диаграмма для плотностей токов в диэлектрике.

Поверхностная плотность зарядов

$$\dot{\sigma}=\dot{D}=\varepsilon_0\dot{E}+\dot{P}=(\varepsilon_0+\underline{\chi}\varepsilon_0)\dot{E}, \tag{2-7}$$

где $\underline{\chi}$ — комплексная диэлектрическая восприимчивость материала диэлектрика

$$\underline{\chi}=\frac{1}{\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{i_{max}}\frac{1}{c_i+j\omega b_i-\omega^2 a_i}. \tag{2-8}$$

Таким образом, плотность тока смещения

$$\dot{J}_c=j\omega\dot{D}=j\omega\varepsilon_0(1+\underline{\chi})\dot{E}=\dot{J}'+\dot{J}'' \tag{2-9}$$

состоит из плотности мгновенного тока смещения, опережающего по фазе напряженность поля на 90° ($\dot{J}'$), и тока смещения, связанного с процессом поляризации. Плотность тока в диэлектрике равна сумме плотностей тока смещения $\dot{J}_c$ и тока проводимости $\dot{J}_п$, совпадающего по фазе с полем $\dot{E}$, т. е.

$$\dot{J}_д=\dot{J}'+\dot{J}''+\dot{J}_п. \tag{2-10}$$

Векторная диаграмма, иллюстрирующая (2-10), приведена на рис. 2-3.

Комплексная проводимость диэлектрика

$$\underline{\gamma} = \gamma + j\omega\varepsilon_0 (1 + \underline{\chi}). \qquad (2\text{-}11)$$

Введя обозначения

$$\Delta\varepsilon_i = 1/\varepsilon_0 c_i; \quad \omega^2{}_i = c_i/a_i; \quad \tau_i = b_i/c_i, \qquad (2\text{-}12)$$

для комплексной диэлектрической восприимчивости можно записать:

$$\underline{\chi} = \sum_{i=1}^{i_{max}} \frac{\Delta\varepsilon_i}{1 - (\omega/\omega_i)^2 + j\omega\tau_i},$$

и тогда

$$\underline{\gamma} = \gamma + j\omega\varepsilon_0 + j\omega\varepsilon_0 \sum_{i=1}^{i_{max}} \frac{\Delta\varepsilon_i}{1 - (\omega/\omega_i)^2 + j\omega\tau_i}. \qquad (2\text{-}13)$$

На практике диэлектрик часто характеризуют не комплексной проводимостью $\underline{\gamma}$, а эквивалентной комплексной диэлектрической проницаемостью

$$\underline{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \underline{\gamma}/j\omega\varepsilon_0. \qquad (2\text{-}14)$$

Действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости

$$\varepsilon' = \varepsilon_M + \sum_{i=1}^{m} \frac{\Delta\varepsilon_i}{1 + (\omega\tau_i)^2}, \qquad (2\text{-}15)$$

где $\varepsilon_M = 1 + \sum_{m+1}^{i_{max}} \Delta\varepsilon_i$ — сумма относительных диэлектрических проницаемостей вакуума и «мгновенных» видов поляризации, определяющая реактивную составляющую тока через диэлектрик.

Мнимая часть (ε''), определяющая активный ток через диэлектрик и соответственно потери в нем:

$$\varepsilon'' = \frac{\gamma}{\omega\varepsilon_0} + \sum_{i=1}^{m} \frac{\Delta\varepsilon_i \omega\tau_i}{1 + (\omega\tau_i)^2}. \qquad (2\text{-}16)$$

Выражения (2-15) и (2-16) получены в предположении апериодического характера движения первого порядка при установлении инерционных (или замедленных) видов поляризации [2-2].

Отношение модулей действительной части комплексной диэлектрической проницаемости к мнимой называется добротностью материала диэлектрика

$$Q = \varepsilon'/\varepsilon'', \qquad (2\text{-}17)$$

а обратная ей величина представляет собой тангенс угла потерь

$$\operatorname{tg}\delta = 1/Q = \varepsilon''/\varepsilon'. \qquad (2\text{-}18)$$

Частотные зависимости составляющих комплексной диэлектрической проницаемости качественно изображены на рис. 2-4.

С повышением частоты электрического поля смещение заряженных частиц уменьшается, в связи с чем ослабляются замедленные виды поляризации (междуслойная, релаксационная), что приводит к уменьшению поляризуемости диэлектрика и его диэлектрической проницаемости.

В силу того что в реальных диэлектриках постоянные времени установления отдельных видов поляризации распределены случайным образом, частотные зависимости составляющих комплексной диэлектрической проницаемости не имеют таких резких изменений, как показано на рис. 2-4, а изменяются достаточно плавно.

В частности, неполярные диэлектрики имеют практически постоянные диэлектрическую проницаемость и $\operatorname{tg}\delta$ в широком диапазоне частот [2-4]. Спад ε этих диэлектриков происходит плавно и довольно незначительно (ε уменьшается примерно в 2 раза при $\Delta f = 10^{14} \div 10^{15}$ Гц).

На поляризацию диэлектрика также оказывает существенное влияние его температура, поскольку силы взаимодействия, подвижность и энергия частиц зависят от температуры. Особенно существенно температура влияет на релаксационные виды поляризации и структурную поляризацию. Существенное изменение поляризуемости диэлектриков происходит при изменении их агрегатного состояния. Наиболее значительные дипольные потери возникают в области так называемого дипольного максимума [П-1, 2-2], т. е. в той области температур, в которой начинает проявляться дипольная поляризация.

В конденсаторах при наличии газовых включений в диэлектрике при определенном приложенном напряжении и дальнейшем его росте наблюдается резкое возрастание $\operatorname{tg}\delta$, вызванное достаточно мощными ионизационными процессами в диэлектрике или на краю обкладок [П-1]. Пропитка жидкими массами значительно увеличивает напряженность поля, при которой наблюдается начало роста $\operatorname{tg}\delta$ (это связано с повышением напряжения начальных частичных разрядов в пропитанной жидкими массами изоляции). На рис. 2-5 показано влияние пропитки маслом на зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от напряжения для конденсатора с полистирольным диэлектриком [2-4].

Следует отметить, что увеличение tg δ за счет ионизационных процессов происходит в области достаточно сильных полей.

В области низких напряжений в конденсаторах с жидкой пропиткой (особенно полярной) диэлектрика может наблюдаться аномальное возрастание tg δ (рис. 2-6), сильнее проявляющееся при повышенных температурах и низких частотах (так называемый эффект Гартона) [П-1]. Этот эффект обусловлен присутствием в пропитывающей жидкости различных загрязнений ионного характера, движение которых ограничено прослойками пропитывающей жидкости. С ростом температуры падает вязкость пропитывающей жидкости и увеличивается число ионов вследствие процессов диссоциации в жидкости. С ростом частоты приложенного поля этот эффект ослабляется из-за инерционности частиц.

При увеличении амплитуды напряжения возникает так называемый барьерный эффект, когда в течение значительной части периода ионные включения «прижаты» силами поля к стенкам объема (поры), в котором происходят колебания заряженных частиц.

Заметной зависимостью tg δ от напряжения обладает бумажный слоистый диэлектрик, как весьма неоднородный, однако в последнее время такие зависимости, но гораздо более слабые обнаружены также у полипропилена [2-5].

Наложение постоянного поля, большего амплитуды переменной составляющей, приводит к снижению тангенса угла потерь по сравнению со значением tg δ в отсутствие постоянной составляющей. Это явление наблюдалось экспериментально, например, у конденсаторов типов ЛС и ЛСМ. Уменьшение tg δ при наложении постоянного поля объясняется тем, что ионные включения при

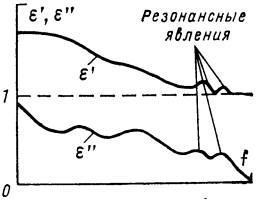


Рис. 2-4. Зависимость составляющих комплексной диэлектрической проницаемости от частоты в логарифмическом масштабе.

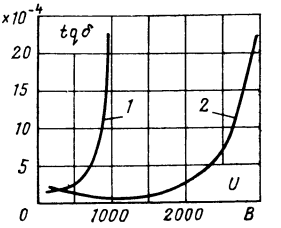


Рис. 2-5. Зависимость tg δ полистирольного конденсатора от напряжения (эффект ионизации).

1 — непропитанный конденсатор; *2* — пропитанный маслом конденсатор.

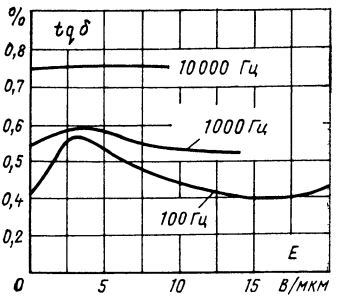


Рис. 2-6. Зависимость tg δ бумажного диэлектрика от напряженности поля при разных частотах.

большом постоянном поле не участвуют в движении, поскольку поле «прижимает» их к стенкам пор. При промежуточных соотношениях постоянной и переменной составляющих барьерный эффект возникает в течение части периода, что приводит к некоторому росту tg δ по сравнению со случаем $U_0 > U_{max}$.

При длительном воздействии на конденсаторный диэлектрик различных нагрузок вследствие старения изоляции происходит увеличение содержания ионных загрязнений, из-за чего рассмотренный эффект усиливается. Однако применение специальных стабилизирующих добавок существенно ослабляет это явление.

2-2. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ

Частичные разряды — важнейший физический процесс, протекающий в изоляции конденсаторов при достаточно высоких напряженностях поля и в основном определяющий срок службы современных конденсаторов переменного тока и особенно импульсных [П-3].

Для достижения высоких удельных характеристик конденсатора, являющегося накопителем электрической энергии, среднюю напряженность поля в активном диэлектрике стремятся поднять до предельно допустимого (с точки зрения обеспечения необходимой долговечности и безотказности) значения.

Важно отметить, что электрическое поле в активном диэлектрике является неоднородным. Причины, обусловливающие эту неоднородность, достаточно многочисленны. Основные из них: неоднородность самого диэлектрика (наличие дефектов в структуре, инородных проводящих, полупроводящих и диэлектрических включений, в частности ионных загрязнений в пропитывающем диэлектрике и т. д.); неравномерность толщины диэлектрика и прослоек пропитывающего вещества; краевой эффект обкладок, обусловленный взаимным сдвигом краев обкладок, их неровными краями и в определенной мере конечной толщиной обкладок. Кроме этого, неоднородность поля может быть вызвана дефектами при производстве секций — складками, морщинами и т. д.

Все это приводит к тому, что локальные напряженности электрического поля могут существенно (в несколько раз) отличаться от среднего значения, рассчитываемого как отношение рабочего напряжения к средней толщине диэлектрика. Кроме этого, указанные

факторы приводят к появлению тангенциальных составляющих векторов напряженности электрического поля, направленных вдоль поверхности обкладок, приводящих к пробоям пропитывающей жидкости вдоль слоев диэлектрика, поскольку электрическая прочность слоистой изоляции вдоль слоев заметно ниже, чем поперек [П-3].

В местах концентрации электрического поля, кроме повышения вероятности полного электрического пробоя изоляции, создаются благоприятные условия для возникновения частичных разрядов — неполных пробоев в изоляции конденсаторов, представляющих собой коронные и скользящие разряды по поверхности или внутри изоляции [П-3, 2-1].

Наиболее благоприятные условия для возникновения частичных разрядов возникают в секции вблизи краев обкладок при достаточной толщине диэлектрика вследствие образования там существенно неоднородного поля из-за взаимного сдвига краев обкладок и краевого эффекта.

Значительная тангенциальная составляющая напряженности поля в этой зоне может привести к коронному, а затем по мере роста напряжения к скользящему разряду по поверхности закраины секции и, наконец, к полному пробою по поверхности [2-1].

Частичный разряд сопровождается перераспределением зарядов (ионов) на поверхности включения и появлением внутреннего поля, направленного навстречу внешнему. Дальнейший рост напряжения приводит к возрастанию поля во включении и к очередному его пробою (рис. 2-7,*а*). Частота разрядов (при линейном законе изменения напряжения) зависит от скорости подъема напряжения du/dt и от отношения напряжения зажигания к напряжению погасания $U_з/U_п$ (чем оно ближе к единице, тем выше частота частотных разрядов) [П-1, 2-1]. Наличие горизонтального участка в кривой напряжения (где $du/dt=0$) в определенной мере (если не учитывать запаздывание инерционной поляризации) эквивалентно воздействию постоянного напряжения, т. е. частичные разряды на этом участке могут вообще не иметь места (рис. 2-7,*б*) либо быть достаточно малой интенсивности (рис. 2-7,*в*).

При более сложных кривых напряжения частичные разряды могут возникать, когда изменение напряжения Δu, приложенного к обкладкам, превышает $U_з+U_п$ [П-3].

Частичные разряды принято делить на начальные и критические [П-3, 2-1].

Начальные частичные разряды представляют собой ионизационные процессы в газовых включениях непропитанной диэлектрической системы или в неполностью пропитанной с твердой пропиткой, а также пробои прослоек жидкой пропитки слабой интенсивности (меньше 10^{-12} Кл) [П-3].

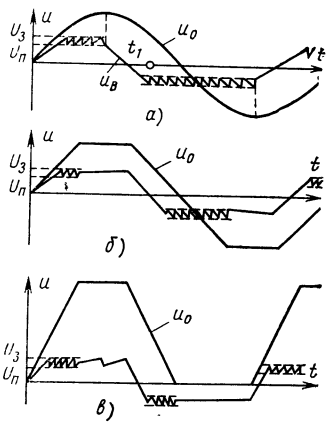


Рис. 2-7. Развитие частичных разрядов в конденсаторной изоляции. *а* — при синусоидальном напряжении; *б* — при симметричном напряжении трапецеидальной формы; *в* — при однополярном напряжении трапецеидальной формы; U_0 — напряжение на обкладках; $U_в$ — напряжение на включении; $U_з$ — напряжение зажигания частичных разрядов; $U_п$ — напряжение погасания частичных разрядов.

Напряженность поля, при которой появляются (т. е. начинают регистрироваться измерительными установками) начальные частичные разряды, называется напряженностью возникновения начальных частичных разрядов или сокращению напряженностью начальных частичных разрядов ($E_{н.ч.р}$). Эта величина зависит от многих факторов как конструктивных и технологических, так и связанных с качеством исходных материалов, применяемых при изготовлении конденсаторов [П-3, 2-6, 2-7, 2-9].

В местах возникновения частичных разрядов происходит разложение жидкого и разрушение твердого диэлектрика под действием ионных и электронных лавин с образованием твердых, жидких и газообразных продуктов. Среди последних могут образовываться сильные окислители — озон, окись азота и др., приводящие к электрохимическому разрушению диэлектрика. В результате этих процессов происходит изменение условий, влияющих на возникновение и поддержание частичных разрядов, вследствие чего после некоторой продолжи-

тельности их существования частичные разряды могут прекращаться на некоторое время, а затем вновь возникать. В силу этих обстоятельств напряженность начальных частичных разрядов не постоянна даже для одной и той же конструкции.

При длительном существовании начальных частичных разрядов внутри конденсатора происходит постепенное накопление продуктов разложения диэлектрика и их распространение по всему объему конденсатора в результате диффузионных процессов, что приводит к ухудшению электрических характеристик диэлектрика [П-3]. После насыщения негазостойкой пропитывающей жидкости газами в ней могут образоваться газовые пузырьки, облегчающие развитие и существование частичных разрядов.

Если напряженность поля в диэлектрике повышать, то интенсивность частичных разрядов будет также повышаться, в результате чего усилится разложение диэлектрика. При достаточно большой интенсивности (около 10^{-10}—10^{-9} Кл) частичные разряды переходят в стадию критических частичных разрядов, приводящих к быстрому разрушению некороностойких диэлектриков [П-3, 2-8, 2-9].

При сравнительно продолжительном существовании критических частичных разрядов (сотни—тысячи секунд) напряжение их существования может снизиться до минимального уровня, при котором в отсутствие критических частичных разрядов могут возникать только начальные частичные разряды [П-3, 2-1].

Если напряжение снизить ниже значения, при котором поддерживаются критические частичные разряды, то последние затухнут, выделившиеся газы растворятся в жидкой пропитке и произойдет восстановление уровня возникновения начальных и критических частичных разрядов практически до значения, близкого к первоначальному.

Короностойкость пропитанных жидкостями диэлектриков зависит в основном от газостойкости их пропитки, т. е. от газовыделяющей и газопоглощающей способности жидкой пропитки [П-3, 2-7].

Напряженность возникновения и существования начальных и критических частичных разрядов зависит от многих конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, таких, в частности, как частота и

форма воздействующего напряжения, температура и давление в конденсаторе и т. д. Достаточно полное объяснение этих зависимостей содержится в [П-3]. Ниже рассматриваются некоторые, наиболее важные для потребителей конденсаторов аспекты этих вопросов. Это прежде всего частотные зависимости характеристик частичных разрядов (рис. 2-8,*а*). Напряженность начальных частичных разрядов практически не зависит от частоты до $f=10^5$ Гц, т. е. их возникновение зависит только от напряжения, тогда как напряженность критических частичных разрядов падает с ростом частоты. При переменном напряжении частичные разряды возникают на каждом полупериоде и их интенсивность (число разрядов в единицу времени) оказывается почти пропорциональной частоте [П-3]. В связи с этим для поддержания частичных разрядов заданной интенсивности с ростом частоты необходимо снижать приложенное напряжение.

При повышении частоты переменного тока вследствие роста интенсивности частичных разрядов разница между напряженностью существования критических и начальных частичных разрядов постепенно уменьшается и при частотах порядка 10^3—10^4 Гц для бумажно-масляного диэлектрика и 10^4—10^5 Гц для бумажного с хлордифениловой пропиткой это отличие становится настолько малым, что измерительная аппаратура не позволяет отличить критические частичные разряды от начальных, т. е. наблюдается непосредственный переход начальных частичных разрядов в критические (рис. 2-8,*а*).

Другой важной характеристикой является зависимость напряженностей частичных разрядов от температуры (рис. 2-8,*б*) [П-3].

Напряженность начальных частичных разрядов слабо зависит от температуры, тогда как напряженность критических частичных разрядов существенно зависит от нее, особенно в случае пропитки хлорированными дифенилами. Понижение давления приводит к снижению напряженностей частичных разрядов, так как электрическая прочность жидкостей и их способность к газопоглощению падают с уменьшением давления, а газовыделение растет [П-3].

Важнейшей для практики характеристикой, определяющей в значительной мере долговечность конденсаторов переменного тока, является зависимость интенсивности частичных разрядов от напряженности поля. Со-

гласно [П-3] мощность частичных разрядов при синусоидальном напряжении связана с напряженностью и частотой следующим соотношением:

$$P_{\text{ч.р}}=AE^{c}f^{n}, \qquad (2\text{-}19)$$

где A, c, n — коэффициенты, зависящие от конструкции, типа диэлектрика, пропитывающей жидкости, температуры и других факторов.

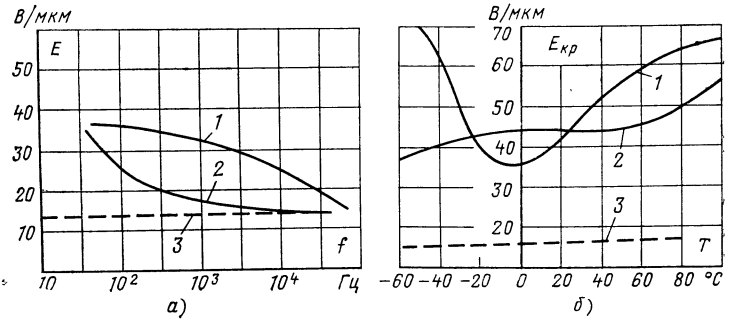


Рис. 2-8. Частотные (*а*) и температурные (*б*) зависимости напряженности возникновения частичных разрядов в бумажном диэлектрике толщиной 60 мкм.

1 — диэлектрик пропитан трихлордифенилом; *2* — диэлектрик пропитан минеральным маслом; *3* — напряженность начальных частичных разрядов.

Для бумажной изоляции пропитанной жидкими диэлектриками, в частности, $c\approx 5\div 8$ (в среднем 6), а $n\approx \approx 0{,}6\div 1{,}0$ [П-3, 2-7, 2-11]. В стадии критических частичных разрядов коэффициент c существенно больше (10-15). Сильная зависимость мощности частичных разрядов от напряженности поля объясняется тем, что с ростом напряженности увеличивается не только частота частичных разрядов (за счет увеличения du/dt), но и количество мест, где возникают частичные разряды [П-3, 2-1].

Важным для практики применения конденсаторов является знание соотношения между рабочей напряженностью электрического поля и параметрами частичных разрядов. В современных силовых конденсаторах с бумажным диэлектриком рабочая напряженность поля на частоте 50 Гц составляет примерно 50% минимальной напряженности возникновения критических частичных разрядов при пропитке хлордифенилами и около 33% $E_{\text{кр}}$ при пропитке минеральным маслом [П-3].

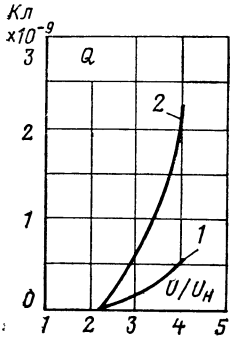


Рис. 2-9. Зависимость интенсивности частичных разрядов от приложенного напряжения в образцах конденсаторов с бумажно-пропиленовым (*1*) и бумажным (*2*) диэлектриком.

Приведенные соотношения характерны для конденсаторов высокого напряжения с общей толщиной диэлектрика 60—80 мкм. У конденсаторов низкого напряжения с меньшей толщиной диэлектрика эти соотношения меньше в 1,5—2 раза, так как $E_{ч.р}$ растет с уменьшением толщины диэлектрика [П-3], т. е. $E_н \approx (28 \div 25)\% E_{кр}$. У конденсаторов с металлизированными обкладками соотношение между рабочей напряженностью поля и напряженностью частичных разрядов выше в силу более высоких значений $E_н$, принимаемых в этих конденсаторах благодаря свойству самовосстановления [2-12]. В частности, у конденсаторов с пропиткой вазелином, имеющих более низкую напряженность возникновения критических частичных разрядов ($E_{кр} \approx 25$ В/мкм), это соотношение составляет около 0,75 [2-12].

Пропитанные трихлордифенилом бумажно-полипропиленовые конденсаторы в общих чертах имеют параметры частичных разрядов, подобные тем, которые имеют бумажные конденсаторы с такой же пропиткой. Напряженность начальных и критических частичных разрядов в комбинированной изоляции несколько выше, чем у бумажной. Однако основным отличием комбинированного бумажно-полипропиленового диэлектрика является то, что зависимость интенсивности частичных разрядов значительно ниже, чем у чисто бумажного диэлектрика (рис. 2-9) [2-13].

Из рассмотрения рис. 2-9 можно сделать вывод о том, что показатель степени c в (2-19) для комбинированного диэлектрика будет ниже, чем для чисто бумажного.

Таким образом, кратковременная короностойкость комбинированного диэлектрика существенно выше, чем у бумажного, что обусловливает большую стойкость первого к перенапряжениям.

В конденсаторных секциях с твердой пропиткой частичные разряды возникают в воздушных включениях

(если секция неполностью пропитана) или при пробое пропитывающего вещества. При этом давление во включениях повышается, в связи с чем возможно даже затухание частичных разрядов. Полученные в [2-14] данные о значениях напряженности начальных частичных разрядов (34—65 В/мкм) и критических (64,4—97,4 В/мкм) в бумажно-полипропиленовом диэлектрике толщиной 30—70 мкм с эпоксидным компаундом в качестве пропитки свидетельствуют о достаточно высоких параметрах частичных разрядов такого комбинированного диэлектрика и о перспективности разработки конденсаторов на его основе.

2-3. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В КОНДЕНСАТОРАХ

Тепловыделение, теплопередача и теплоотдача в конденсаторах переменного тока — важнейшие тепловые процессы, определяющие распределение температуры внутри конденсаторов, превышение температуры их внутренних частей над температурой внешней среды, от которого в большой мере зависят долговечность и безотказность конденсаторов. Эти процессы могут быть стационарными или переходными в зависимости от продолжительности, интенсивности, характера электрической нагрузки, а также тепловой постоянной времени конденсатора.

Источниками тепловыделения в конденсаторах являются: активный диэлектрик и корпусная изоляция; токоведущие металлические части конструкции конденсатора; нетоковедущие металлические части конструкции конденсатора, находящиеся в магнитном поле рабочего тока конденсатора. Кроме этих основных потерь имеются добавочные потери — от вибрации обкладок, электрострикционных явлений и др. [П-1; П-3, 2-1].

В активном диэлектрике тепловыделение происходит вследствие потерь энергии при его переполяризации в переменном поле, потерь в сопротивлении утечки, а также ионизационных потерь. Основной вклад в потери в активном диэлектрике дают поляризационные процессы. Мощность начальных частичных разрядов на несколько порядков ниже мощности тепловыделения в активном диэлектрике даже при минимальных значениях $\operatorname{tg}\delta$ для неполярных пленочных диэлектриков, в связи с чем при расчетах тепловыделения эту состав-

ляющую потерь учитывать нецелесообразно. Однако при критических частичных разрядах $\operatorname{tg}\delta$ существенно растет (см. рис. 2-5), и в случае форсированного режима работы конденсатора, когда его диэлектрик работает при критических частичных разрядах, может потребоваться учет этой составляющей потерь, для чего необходимо знать $\operatorname{tg}\delta$ диэлектрика при рабочей напряженности поля.

Удельные потери в диэлектрике, Вт/м^3, при синусоидальном поле определяются:

$$p=\gamma E^2, \qquad (2\text{-}20)$$

где E — действующее значение средней напряженности поля, В/м; $\gamma=0{,}55\cdot10^{-10}f\varepsilon\operatorname{tg}\delta$ — удельная проводимость диэлектрика на переменном токе, обусловленная его поляризацией[1] [П-2].

Например, при $E=20\cdot10^6$ В/м, $f=50$ Гц, $\varepsilon=6$ и $\operatorname{tg}\delta=3\cdot10^{-3}$ $p=0{,}55\cdot10^{-10}\cdot50\cdot6\cdot3\cdot10^{-3}(20\cdot10^6)^2=2\cdot10^4$ Вт/м^3.

Поскольку значения напряженности поля, ε и $\operatorname{tg}\delta$ в реальном диэлектрике разные для различных точек, а значения ε и $\operatorname{tg}\delta$, кроме этого, зависят от температуры, являющейся некоторой функцией координат, то выражение (2-20) справедливо только для таких областей, в пределах которых E, ε и $\operatorname{tg}\delta$ можно считать неизменными. Для всего конденсатора потери равны интегралу по объему активной части конденсатора от дифференциального выражения (2-20).

Таким образом, диэлектрик конденсаторов представляет собой среду с внутренним неравномерно распределенным тепловыделением. Распределение тепловыделения по объему активного диэлектрика конденсатора зависит от распределения ε и $\operatorname{tg}\delta$.

На практике обычно упрощают задачу определения тепловыделения, полагая в первом приближении ε и $\operatorname{tg}\delta$ постоянными, равными измеренным значениям в лабораторных условиях и не зависящими от температуры. Дальнейшее уточнение расчетов можно осуществить, предполагая, что температура внутри конденсатора распределена равномерно и равна средней температуре, для которой и определяются значения ε и $\operatorname{tg}\delta$. При этом температура внутри конденсатора также определяется упрощенными методами.

[1] В выражении (2-20) удельные потери, обусловленные током проводимости, ввиду их малости не учтены.

Наконец, задача расчета тепловыделения в диэлектрике может быть решена достаточно точно с использованием электротепловой модели и ЭВМ при одновременном решении задачи тепловыделения, теплопередачи внутри конденсатора и теплоотдачи с его поверхности, с учетом электрических и теплофизических характеристик как самого диэлектрика, так и остальных материалов конструкции конденсатора.

При нормальной эксплуатации конденсаторов, как показывают расчеты и эксперименты, их внутренняя максимальная температура находится в пределах 70—110°С. Для этой области температур большинство диэлектриков имеет сравнительно слабую зависимость $\operatorname{tg}\delta$ и особенно ε от температуры, в связи с чем упрощенные подходы в определении удельного тепловыделения, упомянутые выше, в значительной мере оправданы и дают приемлемую для инженерных расчетов точность.

Другим источником тепловыделения в конденсаторах являются токоведущие части конструкции конденсатора — вводы, внутренние соединительные шинки и проводники, предохранители, контактный узел и обкладки.

В отличие от диэлектрических потерь, которые вследствие инерционной поляризации могут существовать и в те моменты времени, когда ток во внешней цепи конденсатора отсутствует, потери в металлических частях конструкции конденсатора имеют место только при протекании через него тока, т. е. эти потери являются джоулевыми.

Важной особенностью тепловыделения в токоведущих частях (за исключением обкладок) является то, что они в значительной мере локализованы в объеме конденсатора.

Обкладки конденсатора «распределены» по его объему, в связи с чем тепловыделение в них, так же как и тепловыделение в диэлектрике, может рассматриваться как распределенное. Распределение потерь по длине обкладок в секциях со скрытой фольгой и по их ширине в секциях с выступающей фольгой, а также в секциях с металлизированными обкладками неравномерно в связи с изменением распределения тока вдоль обкладок и по их ширине [П-1].

В результате тепловыделения внутри конденсатора повышается температура и возникают процесс теплопередачи, т. е. переноса или эвакуации теплоты из более

нагретых областей внутренней части конденсатора в более холодные, т. е. на его поверхность, а также процесс теплоотдачи с поверхности конденсатора охлаждающей среде [2-15].

В стационарном тепловом режиме количество образующейся в конденсаторе теплоты, определяемое потерями энергии в нем, равно теплоте, отдаваемой с его поверхности охлаждающей среде. В конденсаторе при этом имеет место стационарное температурное поле, характеристики которого зависят в основном от конструкции конденсатора, теплофизических характеристик вещества конструкционных материалов, мощности тепловыделения, температуры охлаждающей среды, вида охлаждения.

Основными задачами, которые необходимо решать при рассмотрении процессов теплопередачи при выборе конденсаторов для работы в ТП, являются: определение максимальной температуры, средней температуры внутри конденсатора и превышения температуры поверхности конденсатора.

Для решения этих задач необходимо найти распределение температуры по объему конденсатора. Неравномерное распределение источников тепловыделения по объему конденсатора существенно осложняет задачу расчета температурного поля внутри конденсатора. Сложность получения точных решений и трудности их экспериментальной проверки на готовых образцах конденсаторов приводят к необходимости применения упрощенных методик расчета максимальной и средней температуры внутри конденсаторов, приемлемых при проектировании ТП.

Основой для такого упрощенного подхода может служить равенство, определяющее максимальное превышение температуры в конденсаторе над температурой охлаждающей среды:

$$T_{max}-T_0=\theta=P(R_в+R_н)=PR_{max}, \qquad (2\text{-}21)$$

где T_0, T_{max} — температура охлаждающей среды и максимальная температура внутри конденсатора; P — полная мощность тепловыделения в конденсаторе; $R_в$, $R_н$ — соответственно внутреннее и наружное тепловое сопротивления конденсатора.

Такое разделение полного максимального теплового сопротивления конденсатора R_{max} на составляющие до-

пустимо в случае, когда все точки корпуса имеют близкие температуры.

Для нахождения наружного теплового сопротивления конденсатора можно воспользоваться уравнением теплоотдачи с поверхности конденсатора [П-1—П-3]

$$(T_к - T_0)\,\alpha S = P, \qquad (2\text{-}22)$$

откуда с учетом (2-21)

$$R_н = 1/\alpha S, \qquad (2\text{-}23)$$

где $T_к$ — средняя температура корпуса конденсатора, °С; α — средний коэффициент теплоотдачи поверхности конденсатора, Вт/(м²·°С); S—площадь поверхности охлаждения конденсатора, м².

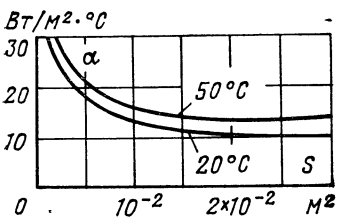


Рис. 2-10. Зависимость коэффициента теплоотдачи конденсаторов от площади поверхности охлаждения при превышении температуры корпуса на 20 и 50°С.

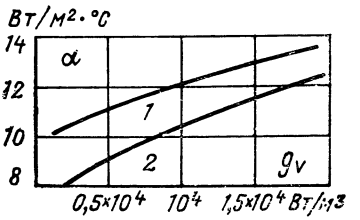


Рис. 2-11. Зависимость коэффициента теплоотдачи от удельного тепловыделения у малогабаритных (*1*) и крупногабаритных (*2*) конденсаторов при естественном воздушном охлаждении.

Зависимости коэффициента теплоотдачи α от площади S, полученные с некоторой коррекцией по данным экспериментов для современных типов конденсаторов с прямоугольными и цилиндрическими корпусами при их вертикальном положении, приведены на рис. 2-10 [П-1, П-2].

При горизонтальном положении таких конденсаторов коэффициент теплоотдачи примерно на 10—20% больше. На коэффициент теплоотдачи α одиночного конденсатора, кроме площади поверхности охлаждения, превышения температуры, влияют также форма корпуса, способ его крепления на металлическом шасси [2-17].

На рис. 2-11 приведены зависимости, позволяющие уточнить значение коэффициента теплоотдачи при изменении удельного тепловыделения в конденсаторе.

При близком расположении конденсаторов в батарее наружное тепловое сопротивление $R_н$ возрастает по сравнению с одиночным конденсатором вследствие взаимного влияния конденсатора друг на друга.

Степень увеличения $R_н$ конденсаторов в батарее зависит от зазора между ними, от формы корпуса, от количества конденсаторов в батарее и ряда других факторов. Так, при расположении малогабаритных конденсаторов с цилиндрической формой корпусов (К75-10, К71-4, К72-11 и других типов) вплотную при вертикальной компоновке в один ряд $R_н$ практически не меняется. Если такие конденсаторы компоновать в батарею с числом рядов больше двух, то у конденсаторов внутренних рядов, как показали измерения температуры их корпусов, $R_н$ возрастает в 1,2—1,5 раза.

У конденсаторов с прямоугольной формой корпуса увеличение $R_н$ при их расположении без зазоров в батарее в один ряд составляет примерно 1,3—1,6 раза при контактировании конденсаторов узкими гранями и в 1,5—2 раза при контактировании широкими гранями. При компоновке таких конденсаторов в батарею без зазоров с числом рядов больше двух $R_н$ у конденсаторов в центре батареи может увеличиться в 2 и даже в 3 раза.

Приведенные выше данные относятся к конденсаторам, у которых высота больше поперечных размеров. У конденсаторов с высотой, меньшей поперечных размеров, взаимное влияние на теплоотдачу в батарее слабее.

Расположение конденсаторов в батарее с зазорами позволяет увеличить их тепловую нагрузку, однако при этом возрастает объем батареи, поэтому в батарее из конденсаторов с прямоугольной формой корпуса существует оптимальный зазор между отдельными конденсаторами, при котором удельные параметры батареи максимальны. Этот зазор равен для конденсаторов малой мощности 5—10 мм, для средней — 10—20 мм и для большой — 20—40 мм.

Наружное тепловое сопротивление конденсаторов в батарее при их расположении без зазоров можно заметно уменьшить, если конденсаторы расположить на металлическом шасси, хорошо проводящем теплоту. Улучшению конвективного охлаждения конденсаторов в батарее способствует перфорация шасси. Необходимо

также отметить, что с уменьшением давления охлаждающей среды значение $R_н$ падает [1-2].

Более эффективным средством снижения температуры поверхности корпуса конденсаторов, а следовательно, и максимальной температуры в нем является принудительное воздушное охлаждение конденсаторов[1]. На рис. 2-12 приведена экспериментальная зависимость среднего по площади коэффициента теплоотдачи пло-

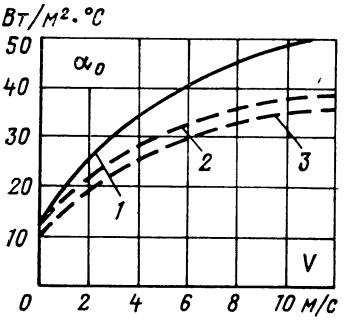
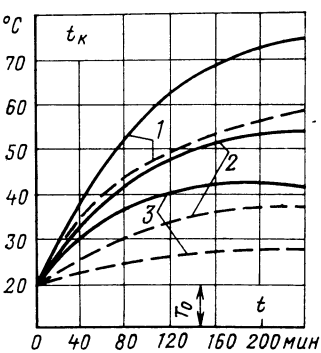
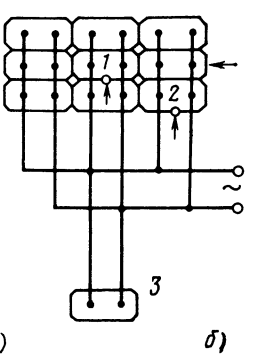


Рис. 2-12. Зависимость коэффициента теплоотдачи при принудительном воздушном охлаждении.

Рис. 2-13. Зависимость температуры поверхности корпусов конденсаторов типа К42-15 (C=10,0 мкФ. $U_н$=630 В) от времени (*а*) и форма батареи конденсаторов и точки измерения температуры (*б*).





ской металлической пластины квадратной формы площадью 150 см² от скорости охлаждающего воздуха при одностороннем обдуве (кривая *1*). Пунктирными линиями на рис. 2-12 показаны зависимости средних коэффициентов теплоотдачи корпусов одиночных конденсаторов малой мощности прямоугольной (кривая *3*) и круг-

[1] Принудительное водяное охлаждение конденсаторов является еще более эффективным, однако оно существенно усложняет их конструкцию [П-2, П-3].

лой формы (кривая *2*) при расположении их корпуса наибольшим размером поперек воздушного потока.

При установке конденсаторов в батареи эффективность их принудительного охлаждения падает из-за экранирующего влияния конденсаторов друг на друга. На рис. 2-13,*а* приведены зависимости температуры поверхности корпусов конденсаторов, расположенных в различных местах батареи, от времени (рис. 2-13,*б*) при естественном (сплошные линии) и при принудительном (пунктирные линии) охлаждении со скоростью 6 м/с. Направление обдува показано на рис. 2-13,*б* стрелкой справа. Основной эффект уменьшения превышения температуры корпусов центральных конденсаторов батареи в этом случае достигается за счет увеличения теплоотдачи с их крышек.

Применение принудительного воздушного охлаждения для снижения температуры поверхности конденсаторов весьма эффективно в случае их радиаторной конструкции, которая обеспечивает малое внутреннее тепловое сопротивление секции и большую удельную поверхность охлаждения.

Так, по данным [2-18] удельная реактивная мощность конденсаторов радиаторного типа при принудительном воздушном охлаждении со скоростью 3—4 м/с может быть увеличена в 2—3 раза.

Принудительное воздушное охлаждение, таким образом, целесообразно применять для тех конденсаторов, у которых наружное тепловое сопротивление составляет большую часть полного теплового сопротивления, в частности для малогабаритных конденсаторов. Оно может быть также эффективным средством снижения температуры корпуса конденсаторов большой мощности при повышенной температуре охлаждающей среды.

Определить наружное тепловое сопротивление конденсатора можно из рис. 2-14, 2-15, на которых приведены его зависимости от площади поверхности охлаждения одиночных конденсаторов при естественном воздушном охлаждении при разных значениях удельного тепловыделения в конденсаторах.

Так как наружное тепловое сопротивление конденсаторов обратно пропорционально α [соотношение (2-23)], то все изменения α, связанные с установкой конденсаторов в батареи, и при различных способах крепления и охлаждения непосредственно приводят к изменению на-

ружного теплового сопротивления $R_н$. При естественном воздушном охлаждении наружное тепловое сопротивление конденсаторов с цилиндрическим корпусом в батарее в 1,4—1,8 раза больше, чем у одиночного конденсатора. У конденсаторов с призматическим корпусом в зависимости от расстояния между конденсаторами наружное тепловое сопротивление в 1,5—3 раза больше, чем у одиночного конденсатора.

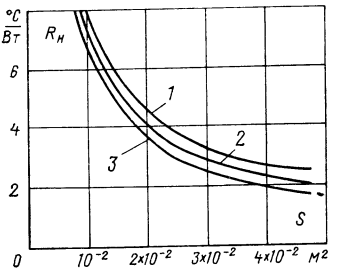


Рис. 2-14. Зависимость наружного сопротивления от площади поверхности охлаждения для малогабаритных конденсаторов.
1 — $q_V = 3 \cdot 10^4$ Вт/м³;
2 — $q_V = 2 \cdot 10^4$ Вт/м³;
3 — $q_V = 1 \cdot 10^4$ Вт/м³.

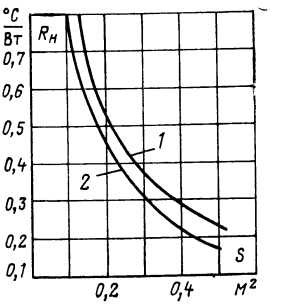


Рис. 2-15. Зависимость наружного теплового сопротивления от поверхности охлаждения силовых конденсаторов средней и большой мощности.
1 — $q_V = 1 \cdot 10^4$ Вт/м³; *2* — $q_V = 2 \cdot 10^4$ Вт/м³.

Внутреннее тепловое сопротивление конденсатора $R_в$ для упрощенной модели имеет чисто расчетный смысл, поскольку эта модель предполагает сосредоточение мощности тепловыделения в конденсаторе в его наиболее нагретой точке и передачу этой мощности к корпусу через сопротивление $R_в$. Таким образом,

$$R_в = P/(T_{max} - T_к), \qquad (2\text{-}24)$$

где P — мощность тепловыделения в конденсаторе; T_{max} и $T_к$ — соответственно максимальная температура внутри конденсатора и температура ее корпуса.

Значение $R_в$ не постоянно, так как T_{max} зависит от распределения мощности тепловыделения по объему. Температурное поле находится путем решения уравнения теплопроводности с распределенными источниками тепла и с учетом анизотропности среды и неравномерности тепловыделения.

Таблица 2-1

Параметр	МБГЧ		К75-10		К42-15		ЛСМ		К72-11		К71-4		КС, КСК		ГСТ, РСТ	
	250-10,0	500-4,0*	250-10,0	500-3,3**	630-4,0	630-10,0	400-3,8	400-7,8	250-3,3	250-0,47	160-10,0	250-1,0	0,38-18	0,66-40	1-50У2	2-4У2
R_{max}, °С/Вт	9,6	6,9	11,6	10,1	8,2	4,7	5,6	4,0	3,7	7,7	13,2	30	0,44	0,45	0,43	0,44 0,2
$R_н$, °С/Вт	6,0	3,4	5,0	4,6	5,1	2,4	4,6	3,3	3,4	7,1	6,4	13	0,24	0,24	0,24	0,24
$R_в$, °С/Вт	3,6	3,5	6,6	5,5	3,1	2,3	1,0	0,7	0,3	0,6	6,8	17	0,2	0,21	0,19	0,2
$R_{ср}$, °С/Вт	8,0	5,4	8,5	7,6	7,1	3,9	5,5	3,9	3,6	7,6	10,2	23	0,36	0,37	0,35	0,35
q_V, Вт/м³	10^4		$1,5 \cdot 10^4$		$1,5 \cdot 10^4$		$1,5 \cdot 10^4$		$1,5 \cdot 10^4$		10^4		$0,7 \cdot 10^4$		$0,8 \cdot 10^4$	
$P_м/P$	0,1		0,1		0,25		0,1		0,8		0,8		0,2		0,35	

* То же для МБГЧ750-2,0 и МБГЧ1000-1,0.
** То же для К75-10-750-1,5, К75-10-1000-1,0.

В табл. 2-1 приведены значения наружного $R_н$, внутреннего $R_в$, максимального R_{max} и среднего $R_{ср}$ тепловых сопротивлений для конденсаторов некоторых типов. В этой таблице приведены данные о режиме работы, для которого определялись тепловые сопротивления конденсаторов: удельная мощность тепловыделения и доля потерь в металлических частях конденсатора $P_м/P$.

Максимальная температура внутри конденсатора

$$T_{max}=PR_{max}+T_0. \qquad (2\text{-}25)$$

Аналогично находится средняя температура по объему конденсатора, необходимая для приближенной оценки $\operatorname{tg}\delta$ и потерь энергии

$$T_{ср}=PR_{ср}+T_0. \qquad (2\text{-}26)$$

Так как тепловыделение в конденсаторе P зависит от средней температуры в нем вследствие зависимости $\operatorname{tg}\delta$ от температуры, то для правильной оценки $T_{ср}$ и T_{max} расчет по (2-25) и (2-26) необходимо повторить 2—3 раза, корректируя значения $\operatorname{tg}\delta$ и P согласно получаемым значениям $T_{ср}$. Очевидно, что получаемые значения T_{max} и $T_{ср}$ будут несколько отличаться от точных значений в основном из-за зависимости R_{max} и $R_{ср}$ от тепловыделения P.

Тепловая стабильность конденсаторов является важным условием обеспечения его работоспособности. Так как удельное объемное тепловыделение в конденсаторе зависит от температуры (вследствие температурной зависимости его емкости и $\operatorname{tg}\delta$), то в случае, когда тепловыделение в нем больше, чем конденсатор может рассеять в окружающее пространство с поверхности, возникает лавинообразное нарастание внутренней температуры.

Нарушение теплового баланса в реальных конденсаторах завершается электротепловым пробоем нагревостойких диэлектриков из-за снижения электрической прочности при увеличении температуры[1] [П-1].

В случае диэлектриков с низкой нагревостойкостью, например полистирола, обычно перед пробоем возникает

[1] Электротепловой пробой диэлектрика конденсаторов возможен также и без нарушения его тепловой стабильности при большом значении внутренней температуры вследствие перегрузки конденсатора по активной мощности.

термическое разрушение диэлектрика (обугливание, проплавление и т. д.) (рис. 2-16).

Для оценки параметров критического (предельно допустимого по условию обеспечения тепловой стабильности) режима работы конденсатора необходимо определить критическую мощность тепловыделения в стационарном тепловом режиме.

Проще всего последняя находится при синусоидальном напряжении приближенным графоаналитическим методом [П-2, П-3].

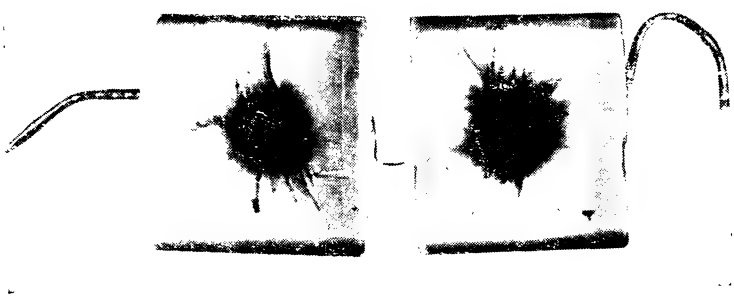


Рис. 2-16. Тепловой пробой секции металло-бумажного конденсатора МБГЧ.

Сущность метода состоит в том, что уравнения тепловыделения, теплопередачи и теплоотдачи решаются графически при таких допущениях, как постоянство внутреннего и внешнего установившегося теплового сопротивления конденсатора, усреднения температуры по его объему и ряда других. Для определения критической мощности тепловыделения и критической температуры в конденсаторе строится зависимость $P=U^2\Omega C \operatorname{tg}\delta$ от температуры, например, в номинальном режиме [рис. 2-17, кривая $P_1(T)$].

Уравнение, связывающее температуру в конденсаторе и мощность тепловыделения, при температуре охлаждающей среды T_0 и указанных выше допущениях соответствует прямой линии

$$P=(T-T_0)/R_{\text{ср}}=(T-T_0)\operatorname{tg}\varphi.$$

Угол наклона этой прямой φ зависит от установившегося значения среднего теплового сопротивления кон-

денсатора $R_{ср}$, т. е. от его конструкции, номинальной емкости, режима работы, и т. д.

Очевидно, что точка A_1 (рис. 2-17) является точкой установившегося теплового режима, а расстояние O_1B_1 равно превышению внутренней температуры конденсатора над окружающей средой. Если повысить тепловыделение в конденсаторе, например за счет увеличения на нем напряжения, то зависимость тепловыделения от температуры пройдет выше [кривая $P_2(T)$], вследствие чего тепловое равновесие (точка A_2) достигается при большем превышении температуры конденсатора (O_1B_2).

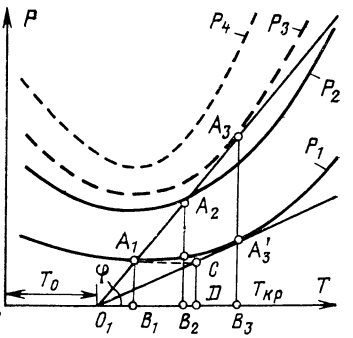


Рис. 2-17. К определению критической мощности тепловыделения в конденсаторе.

Критический тепловой режим конденсатора будет иметь место при напряжении U_3, когда прямая теплоотводящей способности конденсатора касается в точке A_3 кривой температурной зависимости $P_3(T)$. При напряжении, большем U_3 (например, $U_4 > U_3$), возникает тепловая нестабильность конденсатора, поскольку прямая теплоотводящей способности конденсатора и температурная зависимость тепловыделения в нем не пересекаются и не касаются (кривая P_4). Так как изменение значения P здесь производится за счет напряжения, причем полагается, что ни емкость конденсатора, ни его $\operatorname{tg}\delta$ не зависят от напряжения, то для нахождения критической мощности тепловыделения и критической температуры достаточно провести прямую из точки O_1, касающуюся кривой $P_1(T)$ в точке A'_3. Тогда критическая мощность тепловыделения в конденсаторе равна [П-2].

$$P_{кр} = P' \frac{O_1D}{O_1B_1}, \qquad (2\text{-}27)$$

где $P_1 = A_1B_1$ — мощность тепловыделения, характеризуемая точкой A_1 (в нашем примере это активная мощность конденсатора при температуре охлаждающей сре-

ды T_0 и номинальном напряжении и частоте). Расчеты параметров критического режима, выполненные на ЭВМ для конденсаторов МБГЧ, обладающих сильной зависимостью $\operatorname{tg}\delta$ от температуры, показали, что тепловая неустойчивость возникает при $T_0=50\div70°C$ в наиболее крупных конденсаторах при внутреннем превышении температуры 30—40°С, т. е. при мощностях тепловыделения около 7—12 Вт.

В случае, когда тепловыделение в конденсаторе изменяется за счет частоты напряжения, указанный подход к оценке критического теплового режима дает несколько большую погрешность, так как с изменением частоты изменяются как температурная зависимость $\operatorname{tg}\delta$, так и среднее тепловое сопротивление. Существуют также другие модификации графоаналитического способа определения критической мощности и температуры $T_{кр}$ [П-3].

Отмеченная выше особенность влияния частоты на температурные зависимости тепловыделения и теплоотвода осложняет определение критического теплового режима конденсаторов при несинусоидальном воздействующем напряжении.

При несинусоидальном напряжении мощность тепловыделения можно представить в следующем виде:

$$P=U^2_1\Omega C\operatorname{tg}\delta_1(T)\,\eta(T), \tag{2-28}$$

где

$$\eta(T)=\sum_{k=1}^{m}\left(\frac{U_k}{U_1}\right)^2 k\,\frac{\operatorname{tg}\delta_k(T)}{\operatorname{tg}\delta_1(T)};$$

k — номер гармоники; $\operatorname{tg}\delta_k(T)$ — температурная зависимость тангенса угла потерь на частоте $\omega_k=k\Omega$.

Таким образом, в случае несинусоидального напряжения для оценки критического теплового режима строится температурная зависимость тепловыделения в конденсаторе (2-28).

Нестационарный тепловой режим конденсатора возникает при изменении тепловыделения в нем (в результате изменения параметров воздействующего напряжения) или при изменении условий охлаждения конденсатора вследствие теплоемкости материалов его конструкции.

Дифференциальное уравнение теплопроводности, описывающее нестационарное температурное поле в конденсаторе, имеет вид [П-3]:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - c'(T, x, y, z)\gamma(x, y, z)\frac{\partial T}{\partial t} = \\ = -q(x, y, z, T). \qquad (2\text{-}29)$$

Применение численных методов решения этого уравнения позволяет получить распределение температурного поля конденсатора в пространстве и времени. Для оценки работоспособности конденсаторов ТП в кратковременных или повторно-кратковременных режимах необходимо знать закон, по которому изменяются максимальное и среднее значения температуры в конденсаторе при ступенчатом изменении тепловыделения в нем. Решения уравнения (2-29), выполненные на ЭВМ для некоторых типов малогабаритных конденсаторов, показали, что как максимальное, так и среднее значения температуры в конденсаторах изменяются по закону, близкому к экспоненциальному с постоянной времени, несколько меньшей, чем тепловая постоянная конденсатора, которая определялась экспериментально как время, необходимое для достижения превышения температуры корпуса 67% ее установившегося значения. При этом для обеспечения условий эксперимента, близких к расчетным, диапазон изменения температуры выбирался в области слабой зависимости $\operatorname{tg}\delta$ конденсаторов от температуры. Наиболее сильные отступления от экспоненциальных зависимостей наблюдаются при малых интервалах нагружения, когда еще не наступает регулярный тепловой режим (секунды-минуты для силовых конденсаторов).

Отступление от экспоненциального закона изменения температуры также имеет место в конденсаторах с сильной зависимостью $\operatorname{tg}\delta$ от температуры (диэлектрик — бумага, лавсан) при ступенчатых изменениях воздействующего напряжения или частоты, поскольку при этом мощность тепловыделения будет переменной во времени.

Тепловые постоянные времени малогабаритных конденсаторов, как показали экспериментальные исследования, составляют десятки минут, тогда как у крупногабаритных конденсаторов они равны 1—2 ч.

Таким образом, можно считать, что при ступенчатом изменении мощности тепловыделения в конденсаторе его температура изменяется по экспоненциальному закону [П-1—П-3]

$$T = T_0 + \Theta_y (1 - e^{-t/\tau_T}), \qquad (2\text{-}30)$$

где Θ_y — установившееся значение превышения температуры конденсатора, находится по (2-21); τ_T — тепловая постоянная времени конденсатора.

Изменение температуры конденсатора при его охлаждении (в случае ступенчатого снятия электрической нагрузки) также происходит по экспоненциальному закону [П-3]

$$T = T_0 + \Theta_y e^{-t/\tau_T}, \qquad (2\text{-}31)$$

Если происходит ступенчатое изменение нагрузки от одного стационарного значения P_1, которому соответствует установившееся превышение температуры Θ_{y1}, до другого стационарного значения P_2 и соответственно Θ_{y2}, то закон изменения температуры во времени имеет вид:

$$T = T_0 + \Theta_{y2} + (\Theta_{y1} - \Theta_{y2})\, e^{-t/\tau_T}. \qquad (2\text{-}32)$$

Из соотношения (2-30) можно найти время воздействия нагрузки, за которое температура в наиболее нагретой точке достигает некоторого значения T_{max}:

$$t_{max} = \tau_T \ln \frac{\Theta_y}{\Theta_y + T_0 - T_{max}}, \qquad (2\text{-}33)$$

здесь

$$\Theta_y = PR_{max},$$

где P — полная мощность тепловыделения в конденсаторе; R_{max} — максимальное тепловое сопротивление конденсатора (см. табл. 2-1).

В более общем случае

$$t_{max} = \tau_T \ln \frac{\Theta_{y2} - \Theta_{y1}}{-T_{max} + T_0 + \Theta_{y2}}, \qquad (2\text{-}34)$$

причем $\Theta_{y2} > \Theta_{y1}$.

Соотношения (2-31) и (2-33) позволяют также определить мощность тепловыделения, при которой для заданного времени воздействия t температура наиболее нагретой точки внутри конденсатора достигает значения T_{max}:

$$P = \frac{1}{R_{max}} \frac{T_{max} - T_0}{1 - e^{-t/\tau_T}}; \qquad (2\text{-}35)$$

$$P_2 = \frac{T_{max} - T_0 - R_{max}P_1 e^{-t/\tau_T}}{R_{max}(1 - e^{-t/\tau_T})}, \qquad (2\text{-}36)$$

где P_1 — мощность тепловыделения перед изменением режима.

При работе конденсаторов в простом циклическом режиме, когда нагрев чередуется с охлаждением, максимальное превышение температуры диэлектрика конденсатора можно найти из следующего выражения:

$$\Theta_{max} = \Theta_y \frac{1 - e^{-t_р/\tau_T}}{1 - e^{-t_ц/\tau_T}}, \qquad (2\text{-}37)$$

где $t_р$ — время работы конденсатора; $t_ц$ — время цикла ($t_ц = t_р + t_п$, где $t_п$ — длительность паузы); $\Theta_{max} = T_{max} - T_0$; Θ_y — установившееся значение превышения температуры в длительном непрерывном режиме при нагрузке равной нагрузке конденсатора в циклическом режиме во время $t_р$.

График изменения температуры в наиболее нагретой точке конденсатора приведен на рис. 2-18.

Максимальное превышение температуры при отсутствии паузы и ступенчатом изменении тепловыделения определяется по формуле

$$\Theta_{max} = \frac{\Theta_{y1}\left(1 - e^{-t_{p1}/\tau_T}\right) + \Theta_{y2}\left[e^{-t_{p1}/\tau_T} - e^{-(t_{p1}+t_{p2})/\tau_T}\right]}{1 - e^{-(t_{p1}+t_{p2})/\tau_T}},$$

где Θ_{y1}, Θ_{y2} — установившиеся значения превышений температуры при мощностях P_1 и P_2; t_{p1}, t_{p2} — продолжительность тепловыделения с мощностью P_1 и P_2.

На практике наблюдаются отступления от экспоненциального характера изменения температуры конденсатора, обусловленные иррегулярным тепловым режимом (десятки и сотни секунд для силовых конденсаторов), а также зависимостью tg δ от температуры.

Из рис. 2-13 видно, что тепловая постоянная времени конденсаторов малой мощности, установленных в батарею без зазоров, несколько больше, чем у одиночных конденсаторов, а также то, что принудительное воздушное охлаждение практически не влияет на тепловую постоянную времени конденсаторов.

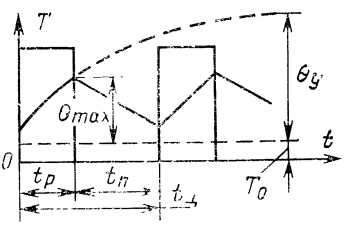


Рис. 2-18. Изменение максимальной температуры конденсатора при простом повторно-кратковременном режиме.

Необходимо отметить, что в рассмотренных выше нестационарных тепловых режимах законы изменения максимальной температуры относятся к случаю, когда источники тепловыделения распределены равномерно. В реальных конденсаторах, как упоминалось выше, имеются локализованные источники тепловыделения, постоянная времени нагрева которых существенно меньше тепловой постоянной времени всего конденсатора. К ним относятся, прежде всего, зона контактного узла, предохранители, токоведущие проводники.

При импульсном тепловыделении в этих местах (например, при импульсном характере тока) температура в них может достигать недопустимо больших значений за весьма короткие промежутки времени [П-4].

2-4. ДОЛГОВЕЧНОСТЬ КОНДЕНСАТОРОВ

Во время эксплуатации на конденсаторы воздействуют различные внешние и внутренние нагрузки: электрические, тепловые, механические. Кроме них оказывает влияние окружающая среда (влага, химические вещества, радиация). В реальных условиях эти воз-

действия не остаются постоянными, их интенсивность изменяется во времени в тех или иных пределах.

В результате этих воздействий в конденсаторе возникает ряд физико-химических процессов, сложным образом влияющих друг на друга.

Следствие протекания этих процессов являются постепенные или достаточно быстрые необратимые изменения электрических, механических, химические и других свойств и параметров изоляции конденсатора, обкладок, контактных узлов и соединений в конструкции конденсатора.

В большинстве проявлений эти изменения представляют собой ухудшение свойств и параметров всех элементов конструкции, т. е. с течением времени происходит старение конденсатора[1].

В соответствии с перечисленными процессами говорят о природе, механизме или форме старения компонентов конденсатора: ионизационной (электрическое старение); термической (тепловое старение); электрохимической (химическое старение); механической (электромеханическое, термомеханическое старение [П-1, П-3]. В реальных условиях в той или иной степени наблюдаются одновременно все или большая часть форм старения, однако обычно преобладающей является ионизационная (электрическая), термическая формы старения или их сочетание [П-1, П-3].

Одновременно с изменением параметров конденсаторов заметно меняются их температурные и частотные зависимости. На рис. 2-19 [2-19] и 2-20 показано изменение температурной и частотной зависимости $\mathrm{tg}\,\delta$.

На рис. 2-19 видно, как влияют добавки в пропитывающую жидкость стабилизирующих компонентов.

Наибольшую стабильность параметров и характеристик обнаруживают конденсаторы с пленочным и комбинированным диэлектриком и фольговыми обкладками. Изменение емкости у них обычно не более чем 0,5% в год для полистирольных конденсаторов и в пределах 1—3% у остальных. Значение $\mathrm{tg}\,\delta$ таких конденсаторов также меняется мало [2-4], а в конденсаторах с бумажно-полипропиленовым диэлектриком с пропиткой

[1] В некоторых современных конструкциях бумажно-пленочных и пленочных конденсаторов наблюдается улучшение со временем ряда электрических свойств — их «регенерация», природа которой в настоящее время еще не до конца установлена.

трихлордифенилом он даже уменьшается со временем [2-13]. Увеличение tg δ пленочных конденсаторов может наблюдаться в случае их эксплуатации при напряженностях начальных и особенно критических частичных разрядов, что приводит к электрическому или тепловому пробою.

Бумажные конденсаторы с металлизированными обкладками являются менее стабильными во времени — изменение их емкости за год, как показали эксперимен-

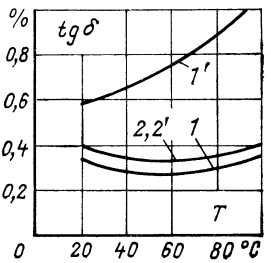


Рис. 2-19. Зависимость tg δ бумажных конденсаторов с пропиткой трихлордифенилом от температуры до (*1*, *2*) и после (*1'*, *2'*) их испытания переменным напряжением в течение 10^4 ч.

1, *1'* — пропитка без стабилизирующей добавки; *2*, *2'* — пропитка с эпоксидным стабилизатором.

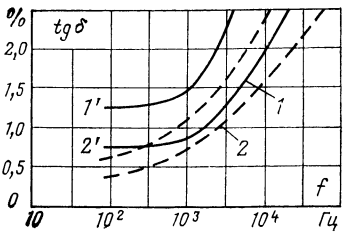


Рис. 2-20. Частотные зависимости tg δ конденсаторов МБГЧ (*1*, *1'*) и К75-10 (*2*, *2'*) емкостью 1,0 мкФ до (*1*, *2*) и после (*1'*, *2'*) термического старения при T=100°C в течение 6000 ч.

ты, может достигать 3—10%, а tg δ — до 150—250% первоначального значения из-за термического старения при T_{max}=90÷100°C. Большее влияние при этом на стабильность tg δ оказывает тип пропитывающего вещества [2-9].

Бумажные конденсаторы с фольговыми обкладками с пропиткой хлорированными дефинилами более стабильны: их срок службы при максимальной температуре диэлектрика в 90—95°C и напряженности поля 15—20 В/мкм достигает 10 и более лет [П-3, 2-9]. Такие же сроки службы имеют бумажно-фольговые конденсаторы с масляной пропиткой, но при напряженностях поля 12—15 В/мкм и температуре 70—75°C. Все изменения параметров конденсаторов в процессе старения происходят в результате деструкции (разрушения) и деградации (перерождения) вещества элементов конструкции

и в первую очередь диэлектрика конденсатора как наиболее нагруженного электрически элемента.

В связи с накоплением в замкнутом объеме конденсатора продуктов разложения, ухудшающих свойства диэлектрика, а также оказывающих непосредственное разрушительное воздействие на изоляцию и металлические части конструкции конденсатора, скорость старения в различные моменты времени является не постоянной [2-9, 2-20], претерпевая не только количественные, но и качественные изменения, например старение может со временем прекратиться и начаться регенерация [2-10].

Причиной ионизационного и электрохимического старения диэлектрика конденсатора с металлизированными обкладками, кроме частичных разрядов, являются также акты самовосстановления [2-12]. Энергия этих актов, составляющая от 10^{-6} до 10^{-4} Дж, существенно (на несколько порядков) превышает энергию частичных разрядов, однако при правильном выборе конденсатора и нормальной эксплуатации эти акты возникают крайне редко, поскольку конденсаторные секции при производстве проходят предварительную тренировку. Влияние актов самовосстановления на характеристики конденсаторов обнаруживается только при достаточно большом их количестве, особенно если они следуют непосредственно друг за другом [П-1, 2-12, 2-21]. Одновременно с увеличением $\operatorname{tg}\delta$, обусловленным накоплением продуктов разложения пропитывающего вещества и твердого диэлектрика, в результате актов самовосстановления происходит уменьшение емкости конденсаторов, вызванное уменьшением площади обкладок (рис. 2-21).

Изменение емкости во времени может также происходить из-за термопластических деформаций в секциях конденсаторов вследствие переменных термомеханических и электромеханических нагрузок. На рис. 2-22 показано изменение емкостей конденсаторов при воздействии на них термических циклов.

Под влиянием температур происходит термическое старение диэлектрика и металлизированных обкладок. Бумажный диэлектрик разрушается в результате термоокислительных реакций, пиролиза — непосредственного термического разложения клетчатки целлюлозы, гидролитических реакций [П-1].

Пиролиз клетчатки характерен для относительных высоких температур (выше 100°С), тогда как термо-

окислительные реакции имеют место уже при нормальных температурах.

В пленочных конденсаторах диэлектрик разрушается в основном под действием частичных разрядов и термоокислительных процессов при повышенных температурах, особенно в присутствии сильных окислителей — озона, атомарного кислорода, окиси азота, появляющихся в результате частичных разрядов [2-4, 2-8].

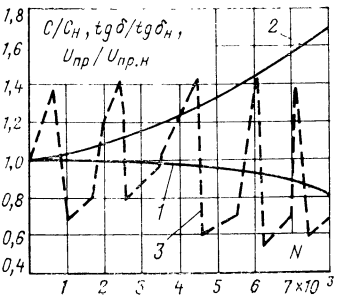
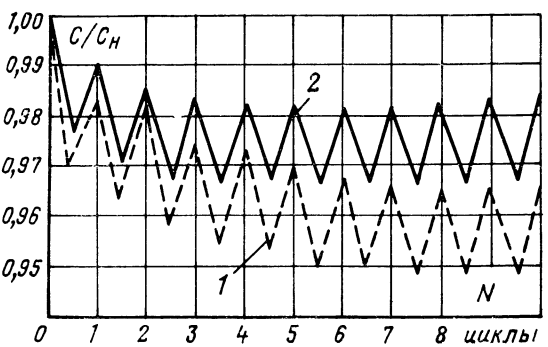


Рис. 2-21. Зависимость емкости (*1*), тангенса угла потерь (*2*) и напряжения пробоя (*3*) металлобумажного конденсатора от числа актов самовосстановления ($C_н$, $U_н$, $tg\,\delta_н$ — начальные значения).

Рис. 2-22. Изменение емкости бумажных (*1*) металлизированными обкладками (МБГЧ) и пленочных (фторопластовых) фольговых (К72-11) (*2*) конденсаторов при воздействии термических циклов.



С повышением температуры увеличивается скорость химических реакций в соответствии с законом Ван Гоффа — Аррениуса [П-3]. Существенное влияние на скорость термического старения диэлектриков оказывает влага, остающаяся в конденсаторах при их производстве, а также появляющаяся там в результате внешних воздействий (в негерметичных конструкциях) или в результате деструкции изоляции конденсатора.

В конденсаторах с металлизированными обкладками повышенные температуры приводят к перерождению

кристаллической структуры слоя металлизации, что вызывает увеличение сопротивления обкладок и переходного сопротивления контактного узла [2-12]. Скорость термической деградации металлизированных обкладок также значительно увеличивается при наличии влаги.

Рост этих сопротивлений и $\operatorname{tg}\delta$ естественно приводит к увеличению мощности тепловыделения и температуры в месте контактирования выводов и обкладок, чем и объясняется ускорение процессов старения с течением времени. В некоторых случаях ускорение старения также связано с непостоянством термического режима: тепловые удары, термические циклы и т. д. При этом помимо термического старения возникают переменные термомеханические напряжения, приводящие к усталостным явлениям в элементах конструкции конденсатора и ускоряющие их старение.

При умеренной температуре диэлектрика и отсутствии частичных разрядов основным видом старения конденсатора становится электрохимическое старение. В конденсаторе протекают различные химические процессы у обкладок и в толще диэлектрика, развитию которых сильно способствуют электрические процессы, в том числе диссоциация веществ изоляции, усиливающиеся с повышением температуры и при наличии влаги.

Электрохимическое старение ускоряется также под воздействием частичных разрядов, актов самовосстановления, а также термической деструкции, в результате которых образуются химически активные вещества, в том числе кислоты, разрушительно действующие на изоляцию, обкладки и другие металлические части конструкции конденсаторов [П-1, 2-9].

Большое влияние на протекание процессов электрохимического старения оказывают различного рода ионные «загрязнения», имеющиеся в исходных материалах и попадающие в конденсаторы при их изготовлении. Присутствие «загрязнений» обнаруживается по зависимости $\operatorname{tg}\delta$ от напряжения (см. § 2-1).

Старение электрической изоляции и металлических частей конденсаторов происходит не равномерно по поверхности или объему, а локализуется в наиболее слабых местах. Центры зарождения процессов старения возникают в местах неоднородностей диэлектрика и обкладок. В этих центрах имеют место повышенные значения напряженности электрического поля, температу-

ры, концентрации продуктов разложения, вероятности возникновения частичных разрядов и т. д.

В конденсаторах с металлизированными обкладками центрами зарождения мест деградации могут быть места вблизи микропробоев при самовосстановлении.

Кроме неоднородностей, фиксированных в толще диэлектрика, в жидких пропитывающих веществах содержатся микро- и макровключения, находящиеся во взвешенном состоянии и способные перемещаться под влиянием электрических, тепловых, механических и других воздействий, создавая дополнительные центры. В силу случайности распределения неоднородностей количество центров, их расположение и процессы возникновения и роста имеют также случайный характер и поддаются только статистическому описанию.

Рост концентрации продуктов разрушения в этих центрах и связанный с ним рост температуры и скорости старения мог бы привести к довольно быстрому выходу из строя конденсатора. Однако благодаря диффузионным процессам эти продукты постепенно распределяются по всему объему конденсатора, ухудшая его интегральные характеристики, но при этом существенно снижается скорость старения в этих центрах и увеличивается срок службы конденсатора.

Для чистопленочных конденсаторов, имеющих большое объемное сопротивление и высокую степень чистоты и однородности, затрудняющие движение ионов, электрохимические виды старения в значительной мере ослаблены, основная форма их старения — ионизационная. Однако при высоких температурах, зависящих от типа пленки, возникают термоокислительные процессы, а сам пленочный диэлектрик при этом обнаруживает значительную усадку или текучесть, что создает механические напряжения и опасность закорачивания обкладок, поэтому для конденсаторов с таким диэлектриком по этой причине, а также для обеспечения электрической прочности строго ограничивается верхний предел температуры. Электрическое старение полимерных диэлектриков рассмотрено в [2-8].

Ионизационный механизм старения является также преобладающим для конденсаторов с непропитанными секциями и с твердой пропиткой.

Старение бумажного диэлектрика вызывается следующими причинами [П-1]: частичными разрядами (на

краю обкладок, в прослойках пропитывающего вещества, в слабых местах в толще диэлектрика, где проявляется сильная неоднородность электрического поля); влиянием продуктов разложения пропитывающего вещества, продуктов химических реакций у обкладок, в толще диэлектрика; термическим разложением бумаги и пропитывающей жидкости.

Старение комбинированных бумажнопленочных диэлектриков в настоящее время изучено слабо. Имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при прочих равных условиях у них процесс старения протекает более медленно, чем у бумажных, а при некоторых условиях с течением времени наблюдается снижение $\operatorname{tg}\delta$ и соответственно внутренней температуры конденсатора [2-13]. Из внешних воздействий наибольшее влияние на скорость старения оказывают электрическая и тепловая нагрузки.

В современных конструкциях конденсаторов для повышения удельных характеристик применяются высококачественные диэлектрики. Тепловые потери в них незначительны, они допускают повышенные напряженности электрического поля. Поэтому у них основной механизм старения — ионизационный, обусловленный частичными разрядами. Поскольку интенсивность частичных разрядов зависит от амплитуды, частоты и формы воздействующего напряжения (см. § 2-2), эти же факторы определяют скорость старения таких конденсаторов, причем наиболее сильно влияет амплитуда напряжения. При работе таких конденсаторов в импульсном режиме или на повышенных частотах в отсутствие частичных разрядов большую роль в старении играют локальные превышения температуры, обусловленные тепловыделением в металлических частях конструкции из-за высоких значений протекающих через конденсатор токов.

Для определения срока службы конденсаторов используется понятие отказа. Отказ конденсатора — это переход его в такое состояние, при котором он полностью прекращает выполнение своей функции или приводит к ненормальному функционированию узла или устройства, содержащего этот конденсатор. В соответствии с таким определением отказы могут быть полные — короткое замыкание обкладок между собой или вывода с корпусом, обрыв цепи внутри конденсатора и частич-

ные или параметрические, возникающие при уходе основных электрических параметров конденсатора (емкости, $\operatorname{tg}\delta$, сопротивления изоляции постоянному току) за пределы допустимых значений, указанных в технической документации или зависящих от функций конденсатора и требований к нему со стороны схемы, в которую он включен.

Параметрические отказы в большинстве случаев связаны с постепенным изменением параметров и характеристик конденсатора, происходящих в результате процессов старения, рассмотренных выше. Осуществляя измерение основных параметров, определяющих работоспособность конденсаторов или устройств с конденсаторами, можно предвидеть момент ухода этих параметров за допустимые пределы, т. е. прогнозировать параметрический отказ.

Полные отказы могут возникать также в результате постепенного ухудшения параметров и характеристик конденсаторов, приводящего к потере электрической прочности или тепловой устойчивости в результате старения. Полные отказы, обусловленные постепенным снижением электрической прочности, могут возникать без заметного изменения других параметров и характеристик конденсаторов. Другие причины полных отказов не связаны со старением, а определяются повреждениями и дефектами элементов конструкции (изоляторов, корпуса, обкладок, диэлектрика и др.), полученными в процессе производства, монтажа или транспортировки [2-22]. Выходной контроль производства и входной контроль потребителя конденсаторов значительно сокращают число отказов, связанных со второй группой причин.

На рис. 2-23 указаны основные причины отказов конденсаторов, их проявления и взаимодействия различных причин. Пунктирными линиями обозначены редко встречающиеся связи и взаимодействия.

Полные отказы обусловлены, в основном, пробоем активного диэлектрика или корпусной изоляции конденсаторов, в результате чего возникает устойчивое короткое замыкание между обкладками или между обкладкой и корпусом, приводящее к полной утрате работоспособности конденсатора[1]. При недопустимо высоких

[1] Пробой на корпус конденсатора может не привести к отказу в случае, если корпус не заземлен, но создает опасность для обслуживающего персонала.

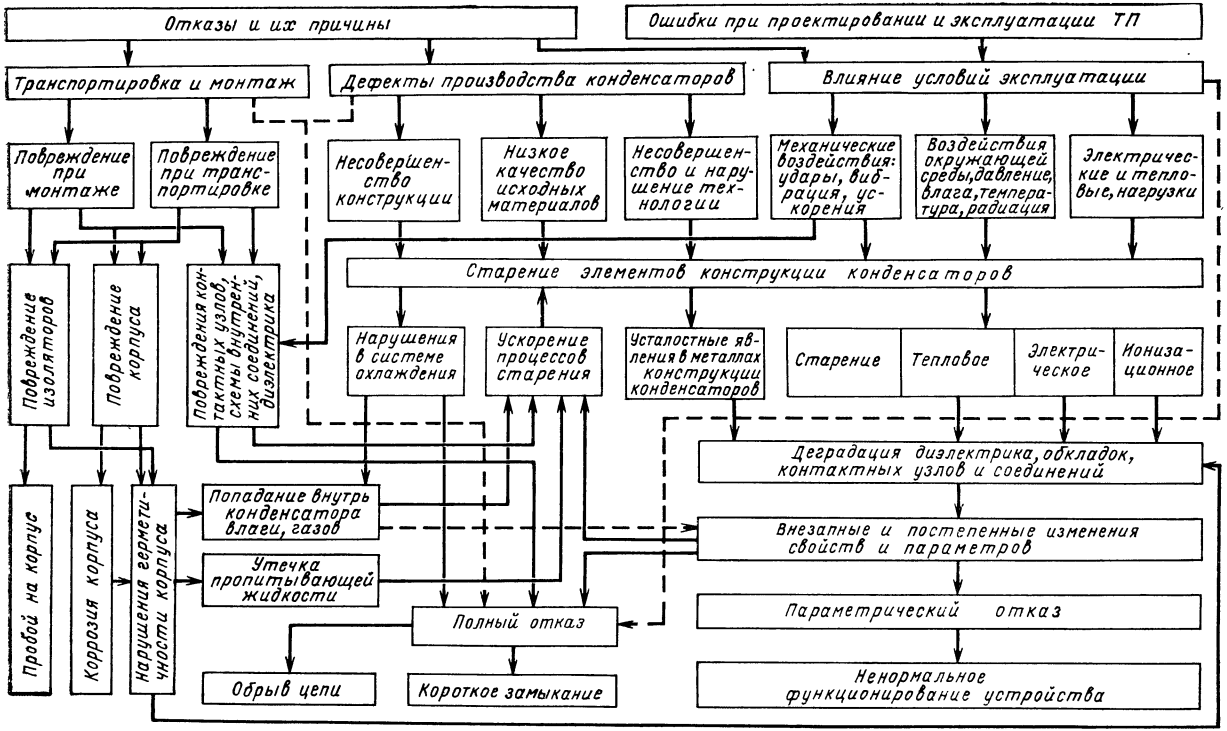


Рис. 2-23. Основные причины отказов, их проявления и взаимодействия.

токовых нагрузках возможен полный отказ из-за перегорания предохранителей либо выгорания обкладок и контактных узлов (в основном у конденсаторов с металлизированными обкладками), приводящих к обрыву цепи. При принудительном воздушном или водяном охлаждении отказ конденсаторов может быть обусловлен отказом в системе охлаждения.

Параметрический отказ встречается в случаях, когда устройство или схема, содержащие конденсаторы, оказываются критичными к их параметрам. Например, резонансные фильтры ТП чувствительны к изменениям емкости.

В других случаях функционального назначения конденсаторов в ТП (коммутирующие, демпфирующие, компенсирующие, фильтрующие конденсаторы широкополосных фильтров и т. д.) изменение емкости конденсаторов на единицы процентов, увеличение $\operatorname{tg}\delta$ и уменьшение сопротивления утечки на десятки и сотни процентов по сравнению с первоначальными значениями практически могут не повлиять на работоспособность ТП. В этих случаях в результате старения обычно возникает полный отказ, в большинстве случаев обусловленный пробоем конденсатора.

Различают следующие виды пробоев: электрический, электротепловой и электрохимический.

Электрический пробой обусловлен разрушением внутренних связей в веществе диэлектрика под воздействием высокой напряженности электрического поля, приводящей к резкому возрастанию проводимости диэлектрика.

Электрический пробой конденсаторов в большинстве случаев связан с возникновением критических частичных разрядов в изоляции (см. § 2-2), поэтому электрический пробой в конденсаторах носит ионизационный характер. Чаще всего этот вид пробоя имеет место при наличии перенапряжений на конденсаторе, особенно при повышенной температуре диэлектрика [П-1].

Длительная электрическая прочность $E_{д.п}$ определяется из условия возникновения электрического пробоя при действии практически всех механизмов старения, описанных выше, после длительного воздействия внешних факторов.

Ионизационное старение при критических частичных разрядах приводит к интенсивному разрушению изоля-

ции и достаточно быстрому (10^1—10^3 с) разрушению диэлектрика и возникновению пробоя. В то же время при начальных частичных разрядах ионизационное старение протекает достаточно медленно и приводит к пробою совместно с электрохимическим старением диэлектрика в центрах локализации частичных разрядов. Время разрушения диэлектрика составляет 10^4—10^8 с [П-1].

При отсутствии частичных разрядов (напряженность поля ниже напряженности возникновения начальных частичных разрядов) основными механизмами старения, приводящими к снижению электрической прочности и пробою конденсатора, становятся электрохимический и тепловой. При преобладании одного из них говорят об электрохимическом или электротепловом пробое.

Увеличение $\operatorname{tg}\delta$ в процессе старения приводит к росту тепловыделения и температуры диэлектрика в конденсаторе. При этом возможен пробой из-за снижения электрической прочности изоляции вследствие роста температуры или появления тепловой нестабильности (см. § 2-3).

Надежность конденсаторов определяется их долговечностью или безотказностью.

В силу случайности процессов старения и причин отказов появление отказов во времени носит случайный характер и определяется средней интенсивностью отказов $\lambda(t)$, которая представляет собой относительную среднюю частоту отказов. Более строго $\lambda(t)$ определяется как вероятность отказа конденсатора в единицу времени после момента времени t, если до него отказ не поступил.

Оценка интенсивности отказов по экспериментальным данным осуществляется по формуле

$$\lambda^*(t)=\frac{m(\Delta t)}{\Delta t N(t)}, \qquad (2\text{-}38)$$

где $m(\Delta t)$ — число конденсаторов, отказавших на интервале времени Δt; t — время, прошедшее от начала испытаний до середины интервала Δt; $N(t)$ — число исправных конденсаторов на интервале Δt.

Характерные кривые изменения интенсивности отказов во времени при различных, но неизменных условиях эксплуатации показаны на рис. 2-24. В начале эксплуа-

тации наблюдается высокая интенсивность так называемых приработочных отказов (участок *I* — период приработки), обусловленных грубыми производственными дефектами в основном технологического характера и выходом из строя наиболее «слабых» конденсаторов. При 100%-ном выходном или входном контроле, исключающем попадание в эксплуатацию конденсаторов с дефектами, приводящими к отказу непосредственно в момент включения или в ближайшее к нему время, кривая интенсивности отказов в начальный период эксплуатации может иметь другой характер [2-23] (такой случай показан штриховой линией на рис. 2-24). Период нормальной эксплуатации (участок *II*), в котором наблюдаются износовые отказы, вызванные старением элементов конструкции конденсаторов, в первую очередь активного диэлектрика, характеризуется минимальным и почти постоянным значением интенсивности отказов.

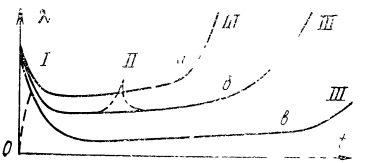


Рис. 2-24. Зависимость интенсивности отказов от времени и нагрузки.

а — эксплуатация при напряжении выше номинального; *б* — при номинальном; *в* — при напряжении ниже номинального.

Возрастание интенсивности отказов на последнем этапе эксплуатации (участок *III*) объясняется проявлением существенного старения диэлектрика и других элементов конструкции конденсатора, в частности металлизированных обкладок. На практике могут наблюдаться различные отклонения от характерного вида кривой $\lambda(t)$. Штрих-пунктирной линией на рис. 2-24 показан аномальный пик увеличения интенсивности отказов, который может возникнуть в связи с дефектами, появившимися при транспортировке, монтаже, а также негрубыми производственными дефектами [2-24]. Под влиянием различных эксплуатационных факторов, производственных дефектов могут наблюдаться деформации кривой $\lambda(t)$ (например, на рис. 2-24 показано влияние рабочего напряжения).

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ является одной из наиболее важных характеристик надежности конденсаторов, поскольку они являются неремонтируемыми изделиями и эксплуатируются до первого отказа. Зная $\lambda(t)$, можно найти вероятность безотказной ра-

боты конденсатора в промежутке времени от нуля до t

$$p(t) = \exp\left\{-\int_0^t \lambda(t)\,dt\right\}. \qquad (2\text{-}39)$$

Можно также определить плотность распределения долговечности или времени жизни конденсатора (промежутков времени от начала эксплуатации до момента отказа), которая, как указывалось выше, является случайной величиной;

$$f(t)=p(t)\lambda(t), \qquad (2\text{-}40)$$

ее интегральную функцию распределения

$$F(t) = \int_0^t f(t)\,dt = 1 - p(t), \qquad (2\text{-}41)$$

среднюю долговечность

$$\tau_{ср} = \int_0^\infty tf(t)\,dt = \int_0^\infty p(t)\,dt, \qquad (2\text{-}42)$$

а также гарантированную долговечность τ_γ, которую имеют конденсаторы с заданной вероятностью безотказной работы:

$$p(\tau_\gamma) = \gamma/100\ \%. \qquad (2\text{-}43)$$

Таким образом, гарантированная долговечность, или γ-процентный ресурс, представляет собой интервал времени τ_γ, в течение которого в заданных условиях эксплуатации сохранят работоспособность γ, %, конденсаторов от первоначального количества.

Основной характеристикой надежности конденсатора, работающего в ТП в определенных эксплуатационных условиях, является его индивидуальная долговечность τ. Для характеристики надежности множества конденсаторов одного и того же типа индивидуальную долговечность τ следует рассматривать как случайное значение. Для нее можно построить функцию распределения $F(\tau)$, представляющую собой вероятность того, что долговечность не превысит фиксированное значение τ (рис. 2-25,*а*) и плотность распределения вероятности случайной величины τ (рис. 2-25,*б*):

$$f(\tau) = \frac{dF(\tau)}{d\tau}. \qquad (2\text{-}44)$$

Величина $f(\tau_1)\Delta t$ приближенно представляет собой вероятность того, что долговечность конденсатора находится в интервале $\tau_1 - \Delta t/2$, $\tau_1 + \Delta t/2$ или, что то же самое, вероятность наступления отказа в этом же интервале.

Функция $p(\tau)=1-F(\tau)$ (рис. 2-25,*а*) представляет собой вероятность безотказной работы в зависимости от времени, т. е. вероятность того, что до момента времени τ не произойдет отказа. Легко заметить, что события, определяющие вероятности $p(\tau)$ и $F(\tau)$, противоположны. Таким образом, как долговечность, так

и безотказность конденсатора определяются одной и той же функцией распределения $F(\tau)$.

Оценкой функции распределения $F(\tau)$ является экспериментально получаемая эмпирическая кривая накопленной частоты отказов во времени испытания, т. е.

$$\hat{F}(\tau) = N_0(\tau)/N, \tag{2-45}$$

где $N_0(\tau)$ — число конденсаторов из N испытуемых, которые отказали к моменту времени τ.

Аналогично для оценки вероятности безотказной работы используется параметр

$$\hat{p}(\tau) = 1 - \hat{F}(\tau) = (N - N_0(\tau))/N. \tag{2-46}$$

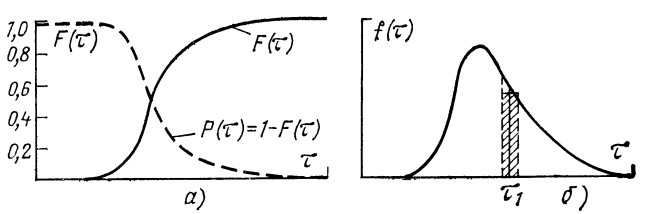


Рис. 2-25. Интегральная функция распределения индивидуальной долговечности конденсаторов (*а*) и плотности распределения ее вероятности (*б*).

В период нормальной эксплуатации, если интенсивность отказов конденсаторов постоянна $\lambda(t)=\text{const}=\lambda$, распределение долговечности подчиняется экспоненциальному закону

$$\gamma = 100\% p(\tau) = 100\% e^{-\lambda\tau}, \tag{2-47}$$

а γ-процентный ресурс τ_γ равен:

$$\tau_\gamma = -\frac{\ln(\gamma/100)\%}{\lambda} = -2{,}3\frac{\lg\gamma - 2}{\lambda}. \tag{2-48}$$

При непостоянной интенсивности отказов приходится иметь дело с более сложными законами распределения. Часто используется аппроксимация функции $\lambda(\tau)$ степенной функцией

$$\lambda(\tau) = \frac{m}{\tau_0}\tau^{m-1}, \tag{2-49}$$

приводящей к распределению Вейбула

$$p(\tau) = \exp\{-\tau^m/\tau_0\}, \tag{2-50}$$

где m и τ_0 — параметры распределения.

Плотность распределения вероятности отказов равна:

$$f(\tau) = \tau_0^m \tau^{m-1} e^{-(\tau/\tau_0)^m}$$

Интегральная вероятность имеет вид:

$$F(\tau) = e^{-(\tau/\tau_0)^m}.$$

Гарантированная долговечность τ_γ определяется в этом случае из (2-50) при 100% $p(\tau_\gamma) = \gamma$:

$$\tau_\gamma = (-\tau_0 \ln \gamma/100\%)^{1/m}. \qquad (2\text{-}51)$$

Кроме ресурса, определяющего потенциальную продолжительность непрерывной эксплуатации конденсатора, различают срок службы, представляющий собой календарную продолжительность его эксплуатации до момента отказа. В отличие от ресурса срок службы включает в себя интервалы времени, когда конденсатор не подвергается электрическим и тепловым нагрузкам.

При вариациях внешних воздействий на конденсаторы их функция интенсивности отказов претерпевает существенные изменения (см. рис. 2-24), следовательно, изменяется распределение долговечности.

Для определения срока службы при заданной напряженности поля проводятся длительные испытания конденсаторов до пробоя, на основе которых строятся зависимости интегральной вероятности пробоя конденсаторов от времени [2-9].

Из таких данных можно также сделать вывод о влиянии приложенного напряжения на срок службы. Так, из данных, приведенных на рис. 2-26, делается вывод о том, что γ % — ресурс полистирольных конденсаторов при 40 В/мкм примерно в 6 раз больше, чем при 48 В/мкм. В настоящее время не существует теоретических моделей старения и отказов конденсаторов, достаточных для определения функций $\lambda(\tau)$ или $F(\tau)$ для различных условий эксплуатации. В то же время многообразие режимов работы конденсаторов в ТП не позволяет для каждого из них определить экспериментально оценки этих функций, поскольку в каждом случае приходится подвергать испытаниям большое число конденсаторов при сравнительно большом числе воздействующих факторов, поэтому в последнее время предпринимаются попытки установления эмпирических связей между долговечностью и основными параметрами, определяющими

режим работы конденсаторов, прежде всего температурой и напряженностью электрического поля в диэлектрике [2-9, 2-20].

Если катастрофический отказ представляет собой четко квалифицируемое событие, то для параметрических отказов с позиций потребителей конденсаторов событие заключается в достижении в процессе старения одним из основных параметров конденсатора заданного предельного значения, зависящего от конкретного при-

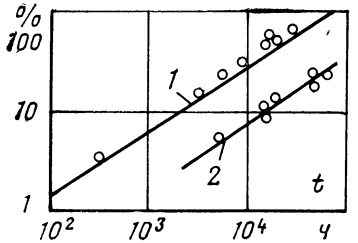


Рис. 2-26. Интегральная вероятность пробоя полистирольных конденсаторов при длительных испытаниях.

1 — для напряженности поля 48 В/мкм; *2* — для напряженности поля 40 В/мкм.

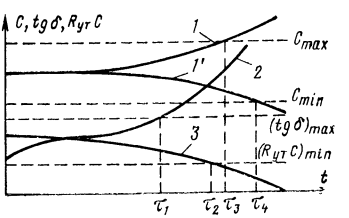


Рис. 2-27. Изменение параметров во времени.

1, *1'* — емкость; *2* — tg δ; *3* — $R_{ут}$.

менения конденсатора. В этом случае целесообразно изучать не только распределение времени отказа, но и всю динамику изменения параметра в процессе старения (рис. 2-27). Тогда полученная экспериментально информация может быть использована более полно, например для различных применений конденсаторов с другими критическими значениями параметров, а также для прогнозирования катастрофических отказов, обусловленных изменением параметров конденсатора во времени. К сожалению, современные представления о физике отказов не позволяют создать достаточно простые модели старения. Наибольший успех в этом направлении достигнут в построении полуэмпирических моделей долговечности конденсаторов, определяемой изменением электрической прочности во времени [2-8, 2-20, 2-26].

Как было изложено выше, в силу случайного характера образования и развития центров старения момент пробоя не одинаков для однотипных конденсаторов, да-

же находящихся в идентичных условиях эксплуатации, поэтому длительную электрическую прочность множества однотипных конденсаторов рассматривают как случайную величину. Для характеристики распределения этой величины часто используется функция Вейбулла [2-26, 2-27]

$$P(E/t) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{E - E_1}{E_2 - E_1}\right)^m\right\}, \qquad (2\text{-}52)$$

где $P(E/t)$ — вероятность того, что по прошествии фиксированного времени t конденсатор пробьется при длительном воздействии напряженности, не превосходящей E; E_1 — наименьшее (граничное) значение напряженности пробоя, меньше которой электрическая прочность данного диэлектрика не может быть; E_2 — длительная электрическая прочность, при которой вероятность $P(E_2/t) = 1 - e^{-1} = 0{,}632$; m — параметр распределения, возрастающий с ростом дисперсии измеренных значений пробивной напряженности E.

В дальнейшем вместо случайной величины электрической прочности используются числовые характеристики распределения, обычно среднее значение или квантиль заданного уровня вероятности γ.

Кратковременная электрическая прочность изоляции конденсатора в результате старения уменьшается с течением времени [П-1, 2-8]. Скорость ее уменьшения определяется интенсивностью процессов старения, зависящей от воздействующих на конденсатор нагрузок, диффузионными и другими процессами в конденсаторе.

Пробой диэлектрика наступает в момент времени, когда его кратковременная электрическая прочность $E_{к.п}$ снизится до значения фактической напряженности электрического поля, длительно воздействующей на диэлектрик.

Типичный характер изменения $E_{к.п}$ во времени при различных постоянных значениях напряженности поля, воздействующего на диэлектрик, показан на рис. 2-28 [2-26], где $E_{к.п0}$ — начальное значение $E_{к.п}$, t_0 — время, через которое наступает пробой при подаче поля E_0 скачком. Интересно отметить, что эти кривые практически совмещаются при линейном изменении масштаба времени. Моменты наступления пробоев (на рис. 2-28 они показаны кружочками) образуют кривую длительной электрической прочности, устанавливающей соот-

ветствие между напряженностью электрического поля, приложенного к диэлектрику, и его долговечностью (временем жизни). На рис. 2-28 эта кривая показана штрихпунктирной линией. Зависимость кратковременной электрической прочности от времени

$$E_{к.п}(t)=[E^{c}_{к.п0}-E^{c}(t/t_0)]^{1/c}, \qquad (2\text{-}53)$$

где $E_{к.п0}$ — начальная кратковременная электрическая прочность; E — напряженность поля, воздействующего на диэлектрик; c — коэффициент, зависящий от вида диэлектрика; позволяет определить момент пробоя, т. е. момент $t_{пр}=\tau$, когда $E_{к.п}(\tau)=E$ [2-26].

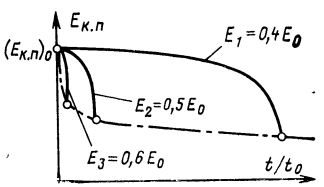


Рис. 2-28. Зависимость кратковременной электрической прочности конденсаторного диэлектрика от времени при различных электрических нагрузках.

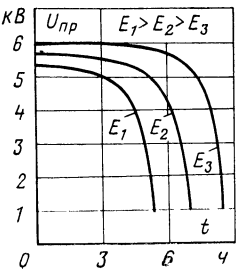


Рис. 2-29. Зависимость от времени напряжения пробоя при испытаниях на кратковременную электрическую прочность для различных электрических нагрузок.

На рис. 2-29 показаны кривые изменения во времени напряжения пробоя при испытаниях на кратковременную электрическую прочность пленки ПТФЭ (фторопласт-4) [2-8]. Эти кривые подтверждают ускорение процессов старения с течением времени и характер их зависимости от воздействующих нагрузок.

Кривые, определяющие длительную электрическую прочность для различных диэлектриков, показаны на рис. 2-30 [2-28].

Существующие в настоящее время модели долговечности конденсаторов используют наиболее существенные воздействующие факторы, преимущественно температуру и напряженность поля.

Первоначально попытки построения моделей долговечности основывались на изучении влияния какого-либо одного фактора. Таким образом, были получены модели [П-1, П-3]

$$\tau = A_1/E^{c_1}, \qquad (2\text{-}54)$$

где E — рабочая напряженность поля; A_1 — коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей; дающие достаточно хорошее совпадение с экспериментальными данными и получившие широкое распространение в практике расчета долговечности и надежности конденсаторов [2-29].

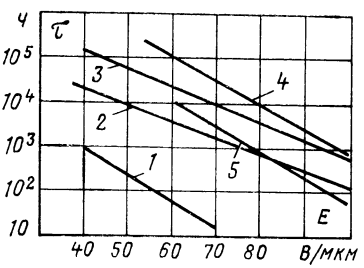


Рис. 2-30. Кривые жизни конденсаторов с различным диэлектриком.

1 — бумага низкой плотности, пропитанная трихлордифенилом (d= = 30 мкм); *2* — полистирольная пленка (d=30 мкм), пропитка маслом; *3* — бумажно-полипропиленовый диэлектрик (d=30 мкм), удельное содержание пленки 67%, пропитка трихлордифенилом; *4* — то же, но с эпоксидным стабилизатором; *5* — полипропилен (d=100 мкм), пропитка трихлордифенилом.

Аналогичные модели были построены также и для температуры

$$\tau = A_2/T^{c_2} \qquad (2\text{-}55)$$

и

$$\tau = \tau_0 e^{-b_1 T}. \qquad (2\text{-}56)$$

Такие модели обладают двумя существенными недостатками: они рассматривают раздельное влияние факторов E и T, тогда как в действительности они действуют совместно; эти модели обладают удовлетворительной точностью в относительно небольшом диапазоне варьирования внешних факторов.

В некоторой степени свободными от указанных недостатков являются модели

$$\tau = A_3/(ET)^{c_3}, \qquad (2\text{-}57)$$

используемые фирмой «Дженерал Электрик» с параметром c_3= =7,7* [2-29, 2-30], и более общие

$$\tau = A_4/E^{c_4}T^{c_5} \qquad (2\text{-}58)$$

---

* Значение параметра c зависит от материала диэлектрика, вида пропитывающей жидкости, а также от характера частичных разрядов: до возникновения частичных разрядов $c \approx 2 \div 3$, при начальных частичных разрядах $c \approx 5 \div 8$ и при критических частичных разрядах $c \approx 12 \div 16$ [П-3, 2-11]. Для пленочных и комбинированных диэлектриков характерна нижняя граница указанных значений c.

й

$$\tau = \tau_0 e^{-b_2 \hat{T}} (E_0/E)^{c_3}, \qquad (2\text{-}59)$$

имеющие большее число параметров [2-27].

Однако и эти модели обладают тем недостатком, что их параметры зависят от напряженности поля, температуры, частоты, формы напряжения, режима работы конденсатора и т. д.

Дальнейшее усложнение моделей [2-27], связанное с учетом этих зависимостей, сопряжено с резким возрастанием числа параметров моделей и объема экспериментальных исследований.

В определенной мере все эти модели учитывают физику отказов, что обусловливает достаточно широкую область их адекватности. Например, (2-56) основывается на предположении справедливости закона Аррениуса для кинетики процесса старения, а (2-54) следует из степенной зависимости мощности частичных разрядов от напряженности поля и приближенного постоянства суммарной энергии частичных разрядов за весь срок службы ($W = P_{\text{ч.р}}\tau \approx \approx \text{const}$) [2-17]. Исходя из последнего можно получить зависимость долговечности от факторов, влияющих на мощности частичных разрядов (2-19).

Согласно приведенным выше моделям, зная долговечность τ_1 при некоторых условиях (E_1, T_1), можно определить долговечность τ_2 в других условиях (E_2, T_2), не определяя коэффициент A, при этом необходимо только знать показатель степени c_i. Например, из модели (2-57)

$$\tau_2 = \tau_1 (E_1 T_1 / E_2 T_2)^{c_3} . \qquad (2\text{-}60)$$

Так можно поступать лишь в том случае, если изменение воздействующих нагрузок не изменяет механизма старения, от которого зависит значение показателя c_3 (т. е. если при этом сохраняется автомодельность процессов старения).

Трудности, связанные с проверкой автомодельности, сохранением неизменными условий испытаний (температуры в конденсаторе), а также ограниченность адекватности применяемых моделей обусловливают наибольшую информативную ценность испытаний, максимально приближенных по режиму к рабочим условиям [2-31], при приемлемой продолжительности испытаний.

В реальных условиях в ТП конденсаторы работают при переменных E и T, т. е. скорость их старения изменяется также в результате изменения интенсивности ионизационных, термических и электрохимических процессов. Для определения срока службы конденсаторов в таких условиях можно воспользоваться формулой (2-60) для эквивалентирования по времени воздействующих нагрузок. Нагрузки интенсивностью E_i и T_i, действующие в течение интервалов времени t_i, можно привести к эквивалентным, т. е. принятым за базовые, нагрузкам с интервалами воздействия t_j, определяемые по (2-60). Таким образом, переменные во времени нагрузки (E_i, T_i, t_i) заменяются постоянной эквивалент-

ной нагрузкой ($E_э$, $T_э$, $t=\sum_1^l t_j$), для которой из (2-60) может быть найден срок службы, если он известен при некотором сочетании E и T. Здесь остаются в силе упомянутые выше требования автомодельности процессов старения. Приближенно при расчете эквивалентного времени изменение интенсивности старения можно учесть изменением показателя c.

В общем случае, когда тепловые и электрические нагрузки изменяются во времени, в том числе и при росте температуры из-за увеличения tg δ во времени, можно записать для эквивалентного времени

$$t_э = \int_0^{t_ф} \left[\frac{E^б T^б}{E(t)\, T_{max}(t)}\right]^c dl, \qquad (2\text{-}61)$$

где $E^б$, $T^б$ — напряженность поля и температура в базисном режиме при испытаниях конденсаторов на долговечность; $E(t)$, $T_{max}(t)$ — нагрузка в эксплуатационном режиме.

Полученное выражение означает, что работа конденсаторов с нагрузками $E(t)$ и $T_{max}(t)$ в течение фактического времени $t_ф$ вызывает такое же старение, как их работа в течение эквивалентного времени $t_э$ с постоянными нагрузками $E^б$, $T^б$. Если в качестве $t_э$ взять срок службы (или ресурс) конденсаторов при $E^б$, $T^б$, то из интегрального уравнения (2-61) можно определить срок службы ($\tau=t_ф$) при переменных нагрузках.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

РАБОТА КОНДЕНСАТОРОВ ПРИ СИНУСОИДАЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ

3-1. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ

Схемы замещения реальных электрических и электронных устройств находят широкое применение при анализе и расчете электромагнитных процессов в этих устройствах благодаря возможности применения к ним стандартных методов расчета электрических цепей [3-1]. Схемы замещения конденсаторов необходимы

для определения токов и напряжений в цепях, в которых используется конденсатор, в том числе тока и напряжения, воздействующего на сам конденсатор; для расчета мощности тепловыделения как в отдельных элементах конструкции конденсатора, так и в целом в конденсаторе; для анализа частотных и временных характеристик цепи, содержащей конденсатор, а также самого конденсатора, наконец, для правильного выбора конденсатора.

К схемам замещения предъявляется ряд требований, определяемых условиями их применения. Основным требованием является эквивалентность в определенных условиях конденсатора и его схемы замещения. Это означает, что для определенных форм напряжений, воздействующих на конденсатор и его схему замещения, токи их должны быть одинаковыми. При этом обеспечивается возможность замены конденсатора некоторой схемой, содержащей идеальные элементы, без какого-либо изменения режима всей цепи.

Для линейных систем, а современные конденсаторы, работающие в области «слабых полей», в большинстве случаев можно считать линейными, требование эквивалентности соответствует совпадению операторных сопротивлений $Z(p)$ конденсатора и его схемы замещения.

Однако помимо эквивалентности к схемам замещения предъявляется еще ряд требований, основными из которых являются: простота схемы замещения, минимальное число ее параметров, единообразие и легкость получения оценок этих параметров, наконец, связь схемы замещения с физическими процессами, протекающими в конденсаторе. В случае, когда предполагается моделирование схемы замещения реальными элементами, дополнительным требованием является условие физической реализуемости.

Основные физические процессы, которые необходимо учитывать при построении схемы замещения конденсатора: протекание тока по металлическим частям конструкции конденсатора и сопутствующее ему тепловыделение в этих частях, а также образование магнитного поля; протекание тока поляризации и утечки через диэлектрик и связанные с ним потери энергии.

Так как физические процессы, связанные с протеканием тока в металлических частях конденсатора и в диэлектрике, имеют различную природу и характер, а также из-за необходимости раздельного вычисления потерь в металлических частях и в диэлектрике (см. § 2-3) целесообразно отдельно рассмотреть схемы замещения этих элементов.

Как следует из гл. 1, конденсаторы ТП работают при синусоидальном (или близком к синусоидальному) напряжении в диапазоне частот от десятков герц до десятков килогерц, а при несинусоидальном напряжении в бо-

лее широком — от долей герц до сотен килогерц. Это дает основание ограничиться анализом схемы замещения конденсаторов в указанных диапазонах.

Схема замещения диэлектрика при синусоидальном напряжении может быть представлена в соответствии с векторной диаграммой плотностей токов, протекающих через диэлектрик (см. рис. 2-3). Эта схема содержит идеальный конденсатор C_0 с емкостью, равной геометрической емкости реального конденсатора, идеальное

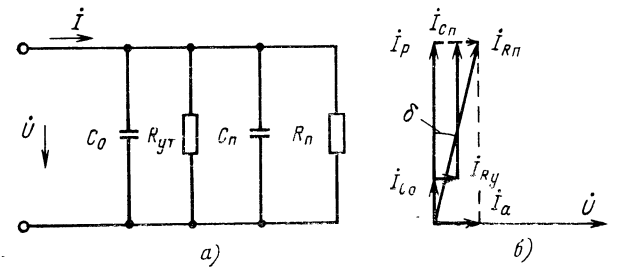


Рис. 3-1. Схема замещения реального диэлектрика (*а*) и векторная диаграмма токов в схеме (*б*).

активное сопротивление $R_{ут}$ равное сопротивлению утечки конденсатора на постоянном токе, а также параллельно включенные поляризационную емкость $C_п$ и сопротивление поляризационных потерь $R_п$ (рис. 3-1,*а*). Векторная диаграмма токов такой схемы приведена на рис. 3-1,*б*. Полученная схема упрощается заменой параллельных конденсаторов одним с результирующей емкостью $C_р=C_0+C_п$ и заменой параллельных резисторов $R_{ут}$ и $R_п$ одним с сопротивлением $R_р=R_{ут}R_п/(R_{ут}+R_п)$.

Таким образом, получается широко известная параллельная схема замещения диэлектрика (рис. 3-2). Физически емкость $C_р$ отображает накопление энергии в электрическом поле между обкладками, а сопротивление $R_р$ — потери энергии в результате перемещения зарядов (как связанных, так и свободных).

Угол δ между током $\dot{I}$ и его реактивной составляющей $I_р$ на диаграмме рис. 3-1,*б* называется углом потерь, поскольку чем больше этот угол, тем больше потери энергии. Значения $C(\omega)$ и $\operatorname{tg}\delta(\omega)$ диэлектрика обычно находят экспериментально путем измерения ха-

рактеристик образцов конденсаторов малой емкости [3-3].

Связь между $\operatorname{tg}\delta$, частотой ω и параметрами схемы замещения находится из векторной диаграммы рис. 3-1,*б*

$$\operatorname{tg}\delta(\omega)=\frac{I_a}{I_p}=\frac{U/R_p(\omega)}{U\omega C_p(\omega)}=\frac{1}{\omega R_p(\omega)\,C_p(\omega)}, \qquad (3\text{-}1)$$

где U — напряжение, воздействующее на диэлектрик; I_a, I_p — активная и реактивная составляющие тока $\dot{I}$.

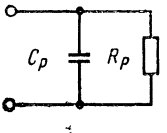


Рис. 3-2. Параллельная схема замещения диэлектрика.

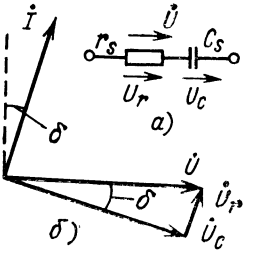


Рис. 3-3. Последовательная схема замещения и ее векторная диаграмма.

Зная $\operatorname{tg}\delta(\omega)$, $C_p(\omega)$, из (3-1) находим значение $R_p(\omega)$:

$$R_p(\omega)=\frac{1}{\omega C_p(\omega)\operatorname{tg}\delta(\omega)}. \qquad (3\text{-}2)$$

Кроме параллельной схемы замещения диэлектрика, можно построить последовательную схему замещения (рис. 3-3,*а*), эквивалентную параллельной, а следовательно, и диэлектрику.

Благодаря своей простоте и эквивалентности диэлектрику последовательная и параллельная схемы его замещения (ниже даны такие схемы для всего конденсатора) достаточно широко используются для расчетов потерь энергии, частотных характеристик, построения измерительных приборов и т. д. [П-1, 3-3].

Для эквивалентности последовательной и параллельной схем замещения необходимо и достаточно равенства полных комплексных сопротивлений (или проводимостей), этих цепочек, т. е. равенства их модулей и аргу-

ментов [3-1]. Для последовательной схемы замещения (рис. 3-3,*а*)

$$Z_s(\omega) = r_s(\omega) - jx_s(\omega) = r_s(\omega) - j\frac{1}{\omega C_s(\omega)} \qquad (3\text{-}3)$$

и

$$\operatorname{tg}\delta(\omega) = \frac{U_r}{U_C} = \frac{Ir_s(\omega)}{I\dfrac{1}{\omega C_s(\omega)}} = \omega r_s(\omega) C_s(\omega), \qquad (3\text{-}4)$$

где I — модуль полного тока через диэлектрик.

Для параллельной схемы замещения имеем:

$$Z_{\text{п}} = \frac{1}{Y} = \frac{1}{\dfrac{1}{R_p(\omega)} + j\omega C_p(\omega)} =$$

$$= \frac{R_p(\omega)}{1 + \omega^2 R^2{}_p(\omega)\, C^2{}_p(\omega)} - j\frac{\omega R^2{}_p(\omega)\, C_p(\omega)}{1 + \omega^2 R^2{}_p(\omega)\, C^2{}_p(\omega)}. \qquad (3\text{-}5)$$

Приравнивая действительные и мнимые части выражений (3-3) и (3-5), получаем связь между параметрами последовательной и параллельной схем замещения.

Таблица 3-1

Последовательная схема замещения	Параллельная схема замещения
$C_s(\omega) = C_p(\omega)\dfrac{1+[\omega R_p(\omega) C_p(\omega)]^2}{[\omega R_p(\omega) C_p(\omega)]^2} = C_p(\omega)[1 + (\operatorname{tg}\delta(\omega))^2]$	$C_p(\omega) = \dfrac{C_s(\omega)}{1+[\omega r_s(\omega) C_s(\omega)]^2} = \dfrac{C_s(\omega)}{1 + [\operatorname{tg}\delta(\omega)]^2}$
$r_s(\omega) = \dfrac{R_p(\omega)}{1+[\omega R_p(\omega) C_p(\omega)]^2} = \dfrac{R_p(\omega)[\operatorname{tg}\delta(\omega)]^2}{1 + [\operatorname{tg}\delta(\omega)]^2}$	$R_p(\omega) = r_s(\omega)\dfrac{1+[\omega r_s(\omega) C_s(\omega)]^2}{[\omega r_s(\omega) C_s(\omega)]^2} = r_s(\omega)\dfrac{1 + [\operatorname{tg}\delta(\omega)]^2}{[\operatorname{tg}\delta(\omega)]^2}$
$\operatorname{tg}\delta(\omega) = \omega r_s(\omega) C_s(\omega)$	$\operatorname{tg}\delta(\omega) = \dfrac{1}{\omega R_p(\omega) C_p(\omega)}$

Аналогичным образом находятся параметры параллельной схемы замещения по известным параметрам для

последовательной схемы замещения. Формулы, устанавливающие связь между параметрами обеих схем замещения, приведены в табл. 3-1.

В соответствии с выражениями (3-1) и (3-4) на рис. 3-4 изображены частотные зависимости tg δ параллельной и последовательной схем замещения при частотно-независимых параметрах.

Необходимым условием эквивалентности обеих схем является равенство углов потерь, что при постоянных

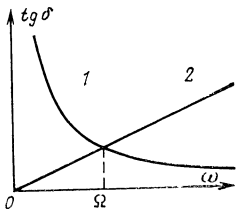


Рис. 3-4. Зависимость тангенса угла потерь параллельной (*1*) и последовательной (*2*) схем замещения от частоты.

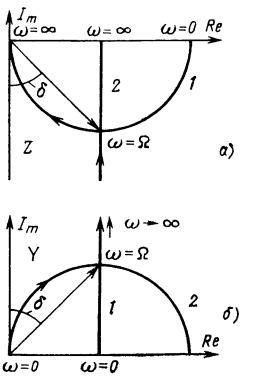


Рис. 3-5. Частотные годографы комплексных сопротивлений (*а*) и проводимостей (*б*) для параллельной (*1*) и последовательной схем замещения (*2*).

параметрах обеспечивается, как следует из рис. 3-4, только при одной частоте Ω. Кроме этого условия, необходимым, как упоминалось выше, является условие равенства модулей полных сопротивлений (или проводимостей) обеих схем, что обеспечивается выполнением соотношений табл. 3-1.

Таким образом, при постоянных, не зависящих от частоты параметрах обеих схем замещения их эквивалентность может иметь место только при одной фиксированной частоте ω=Ω. Различие этих двух схем на других частотах ω≠Ω ясно видно из рассмотрения частотных годографов их комплексных сопротивлений или проводимостей (рис. 3-5). Для обеспечения эквивалентности схемы замещения диэлектрика на различных ча-

стотах параметры этих схем замещения должны быть частотно-зависимыми.

Так, у параллельной схемы замещения емкость $C_p(\omega)$ должна изменяться с частотой так же, как диэлектрическая проницаемость материала диэлектрика. Зависимость $R_p(\omega)$ определяется соотношением (3-2). В практических расчетах, учитывая слабую зависимость диэлектрической проницаемости от частоты, принимаем $C_p(\omega)=\text{const}$. В последовательной схеме замещения для обеспечения эквивалентности ее диэлектрику емкость C_s должна изменяться по закону

$$C_s(\omega)=\frac{C_p}{1+[\operatorname{tg}\delta(\omega)]^2},$$

а

$$r_s(\omega)=\frac{\operatorname{tg}\delta(\omega)}{\omega C_s(\omega)}. \qquad (3\text{-}6)$$

Для неполярных конденсаторных диэлектриков (полистирол, полиэтилен, полипропилен, политетрафторэтилен) $\operatorname{tg}\delta$ и ε в широком диапазоне частот практически постоянны. Они также слабо зависят и от температуры [2-4], поэтому для них параметры схем замещения

$$C_p\approx\text{const};\quad R_p(\omega)=1/\omega C_p\operatorname{tg}\delta; \qquad (3\text{-}7)$$

$$C_s=\frac{C_p}{1+(\operatorname{tg}\delta)^2}\approx C_p;\quad r_s(\omega)=\frac{\operatorname{tg}\delta}{\omega C_s}. \qquad (3\text{-}8)$$

Таким образом, для определения параметров схем замещения диэлектрика в заданном температурно-частотном диапазоне необходимо иметь температурно-частотные зависимости его $\operatorname{tg}\delta$ и емкости, получаемые экспериментальным путем на образцах конденсаторов малой емкости, у которых можно пренебречь влиянием сопротивлений обкладок, выводов и других элементов конструкции на емкость и $\operatorname{tg}\delta$ в заданном диапазоне частот.

Схема замещения токоведущих элементов конструкции конденсаторов (выводов, внутренних соединительных шинок и предохранителей в многосекционных конденсаторах, контактных узлов, обкладок) может быть построена также на основании физических явлений, происходящих в них. Любой элемент конструкции кон-

денсатора обладает некоторым активным и индуктивным сопротивлением (собственным и внесенным за счет электромагнитного поля, обусловленного протеканием тока через конденсатор). В силу проявления поверхностного эффекта и эффекта близости ток распределяется по сечению проводников неравномерно, в результате чего их эквивалентные активные сопротивления возрастают и становятся частотно-зависимыми. Кроме этого, в конденсаторах наблюдаются нелинейные явления в контактных узлах, обусловленные наличием полупроводящих переходных сопротивлений в местах контактных соединений [3-4]. В очень тонких или сильно окисленных металлизированных обкладках также могут проявляться нелинейные эффекты [3-5].

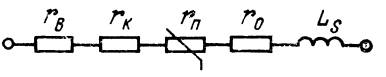


Рис. 3-6. Схема замещения токоведущих частей конструкции конденсатора.

$r_в$, $r_к$, $r_п$ и $r_о$ — сопротивления выводов, контактного узла, переходное от контактного узла к обкладкам и обкладок.

В результате протекания токов возникают магнитные поля, сцепленные с этим элементом, где протекает данный элементарный ток, а также с другими элементами. Эти поля вызывают появление э. д. с. самоиндукции и взаимной индукции как в токоведущих, так и в нетоковедущих элементах конструкции (в крышке, корпусе). В металлических частях конструкции возникают вихревые токи и гистерезисные явления, приводящие к дополнительным потерям энергии, которые тем больше, чем выше частота тока, магнитная проницаемость и электропроводность этих частей [3-6, 3-7]. Это эквивалентно увеличению сопротивления токоведущих частей конденсатора. Так как рабочий ток конденсатора протекает последовательно через его выводы, соединительные шинки, контактные узлы и обкладки, то на схеме замещения эти элементы конденсатора можно представить в виде нескольких последовательно соединенных сопротивлений, соответствующих выводам, $r_в(\omega)$, контактному узлу $r_к(\omega)$, обкладкам $r_о$, нелинейному сопротивлению перехода $r_п(i)$ и суммарной индуктивности L_s выводов, соединительных шинок, контактного узла (рис. 3-6). В конденсаторах с крышкой из магнитного материала в схему рис. 3-6 необходимо добавить сопро-

тивление $r_{кр}(\omega)$, учитывающее потери в крышке. Определять параметры схемы замещения токоведущих частей конденсатора проще всего можно путем использования сочетания расчетных и экспериментальных подходов. Так, сопротивление выводов конденсатора круглого сечения можно рассчитать по формуле [3-6]

$$r_в = \frac{l}{\pi D}\sqrt{\frac{\pi f \mu \mu_0}{\gamma}}, \qquad (3\text{-}9)$$

где D, l — диаметр и длина выводов; μ, γ — магнитная проницаемость и удельная проводимость металла выводов.

Имея экспериментальную частотную зависимость $\operatorname{tg}\delta_к(\omega)$ конденсатора [3-8] и зная $\operatorname{tg}\delta_д(\omega)$ его диэлектрика, можно определить зависимость суммарного активного сопротивления токоведущих частей конденсатора от частоты

$$r_\Sigma(\omega) = \frac{\operatorname{tg}\delta_к(\omega) - \operatorname{tg}\delta_д(\omega)}{\omega C_s(\omega)}, \qquad (3\text{-}10)$$

где $C_s(\omega)$ — емкость конденсатора на частоте ω в последовательной схеме замещения.

Вычитая из этих данных расчетные (или экспериментальные) значения сопротивлений выводов соединительных шинок, можно определить активное сопротивление контактных узлов (вместе с переходными сопротивлениями).

Параметр	МБГЧ-1000-1,0	МБГЧ-500-4,0	МБГЧ-250-10,0	К75-10-1000-1,0	К75-10-500-3,3	К75-10-250-10,0
Эквивалентная индуктивность $L_э$, мкГн	0,1	0,13	0,18	0,051	0,066	0,089
Частота первого резонанса $f_р$, кГц	500	220	125	700	340	195
Активное сопротивление $r_э$ на частоте $f_р$, Ом	0,35	0,17	$6{,}9\cdot10^{-2}$	0,13	$6{,}1\cdot10^{-2}$	$2{,}9\cdot10^{-2}$
Активное сопротивление обкладок $r_о$, Ом	0,12	$5{,}1\cdot10^{-2}$	$9{,}1\cdot10^{-3}$	0,1	$4{,}1\cdot10^{-2}$	$1{,}6\cdot10^{-2}$
Активное сопротивление $r_\Sigma(f)$, Ом	$0{,}12 - 2{,}9\times10^{-4}\sqrt{f}$	$5{,}4\cdot10^{-2} - 2{,}4\times10^{-4}\sqrt{f}$	$1{,}1\cdot10^{-2} - 2{,}1\times10^{-4}\sqrt{f}$	$0{,}1 - 3{,}3\times10^{-5}\sqrt{f}$	$4{,}2\cdot10^{-2} - 3{,}2\times10^{-5}\sqrt{f}$	$1{,}7\cdot10^{-2} - 2{,}9\times10^{-5}\sqrt{f}$

Такой подход, разумеется, допустим только в той области частот, где влиянием индуктивности конденсатора на емкость и $\operatorname{tg}\delta$ можно пренебречь.

В табл. 3-2 приведены параметры схем замещения конденсаторов малой и средней мощности, полученные упомянутым выше путем. Необходимо отметить, что активное сопротивление токоведущих частей конденсаторов зависит от температуры — с ее повышением оно увеличивается. Особенно это заметно по росту $\operatorname{tg}\delta$ с температурой у конденсаторов с металлизированными обкладками [2-4]. Значения активных сопротивлений в табл. 3-2 приведены для температуры 90°С.

На рис. 3-7 показана упрощенная схема замещения конденсатора [1]. Дальнейшее упрощение сводится к тому, что активные сопротивления r_Σ и r_s при последовательной схеме замещения диэлектрика заменяются одним $r_э$, а вместо конденсатора C_s включается конденсатор $C_{sэ}$, эквивалентная емкость которого равна [П-1]:

$$C_{sэ} = \frac{C_s}{1 - \omega L_э C_s}, \qquad (3\text{-}11)$$

[1] Полная схема замещения конденсатора включает в себя также сопротивления утечки корпусной изоляции, подключенные между выводами и корпусом (землей), а также паразитные емкости межсекционные, емкости пакета секций на корпус (землю) и т. д. [П-1; 3-3; 3-11].

Таблица 3-2

К42-15-630-4,0	К42-15-630-10,0	ЛСМ-400-3,8	ЛСМ-400-7,8	К71-4-160-10,0	К72-11-500-1,0	К72-11-250-3,3
0,061	0,066	0,1	0,13	0,098	0,1	0,12
320	200	260	160	160	490	240
$6\cdot10^{-3}$	$3{,}1\cdot10^{-2}$	0,1	$9{,}4\cdot10^{-2}$	10^{-2}	$1{,}35\cdot10^{-2}$	$9{,}1\cdot10^{-3}$
$2{,}6\cdot10^{-2}$	$9{,}1\cdot10^{-3}$	$8{,}9\cdot10^{-6}$	$4{,}3\cdot10^{-6}$	$6{,}5\cdot10^{-3}$	$8{,}2\cdot10^{-6}$	$2{,}6\cdot10^{-6}$
$2{,}7\cdot10^{-2}$— $6\cdot10^{-5}\sqrt{f}$	10^{-2}—$4{,}7\times10^{-5}\sqrt{f}$	$2\cdot10^{-3}$— $2\cdot10^{-4}\sqrt{f}$	$1{,}8\cdot10^{-3}$— $1{,}9\cdot10^{-4}\sqrt{f}$	$7{,}5\cdot10^{-3}$— $6{,}2\cdot10^{-6}\sqrt{f}$	$1{,}8\cdot10^{-5}$— $1{,}7\cdot10^{-5}\sqrt{f}$	$1{,}2\cdot10^{-5}$— $1{,}8\cdot10^{-5}\sqrt{f}$

здесь $L_э$ — эквивалентная индуктивность конденсатора, приближенно равная сумме индуктивностей выводов, соединительных шинок и собственной индуктивности секции. Поскольку секция по существу представляет собой длинную линию с распределенными параметрами r, L и C, то представление ее индуктивности и емкости сосредоточенными величинами в определенной мере условно [3-9—3-11].

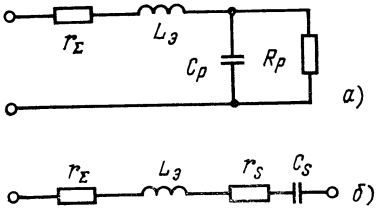


Рис. 3-7. Упрощенные схемы замещения конденсатора.
а — параллельная; *б* — последовательная.

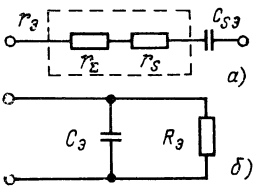


Рис. 3-8. Последовательная схема замещения реального конденсатора (*а*) и эквивалентная ей параллельная (*б*) схема замещения.

Схема замещения реального конденсатора показана на рис. 3-8,*а*, а эквивалентная ей параллельная схема замещения — на рис. 3-8,*б*. Для схемы рис. 3-8,*а*, учитывая (3-11), можно записать:

$$\operatorname{tg}\delta = \omega r_э C_{sэ} = \omega C_{sэ}(r_Σ + r_s) = \frac{\omega C_s r_Σ}{1-\omega^2 L_э C_s} + \frac{\omega C_s r_s}{1-\omega^2 L_э C_s}. \quad (3\text{-}12)$$

Первая составляющая выражения (3-12) представляет ту часть тангенса угла потерь конденсатора, которая определяется активными сопротивлениями металлических токоведущих частей и характеризует потери в них $\operatorname{tg}\delta_м = \omega C_s r_Σ / (1-\omega^2 L_э C_s)$. Вторая составляющая является тангенсом угла потерь в диэлектрике, т. е. $\operatorname{tg}\delta_д = \omega C_s r_s / (1-\omega^2 L_э C_s)$. Учитывая, что $L_э C_s \approx 1/\omega_p^2$, где ω_p — частота первого собственного резонанса конденсатора, тангенс угла потерь всего конденсатора равен:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\omega C_s r_Σ}{1-(\omega/\omega_p)^2} + \frac{\omega C_s r_s}{1-(\omega/\omega_p)^2} = \operatorname{tg}\delta_м + \operatorname{tg}\delta_д. \quad (3\text{-}13)$$

Для выяснения, как изменяется соотношение потерь в диэлектрике и в токоведущих частях с ростом часто-

ты, проанализируем частотные характеристики схем замещения. У неполярных диэлектриков, как упоминалось выше, $\operatorname{tg}\delta$ и ε диэлектрика практически не зависят от частоты. Согласно (3-6) сопротивление r_s обратно пропорционально частоте (при $\operatorname{tg}\delta_д$=const и C_s=const).

Сопротивление токоведущих частей можно рассматривать состоящим из двух составляющих, одна из которых не зависит от частоты, а другая зависит [3-12]

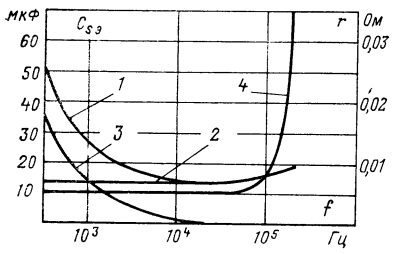


Рис. 3-9. Частотные зависимости сопротивлений $R_э$ (*1*), r_s (*2*), r_Σ (*3*) и емкости $C_{sэ}$ (*4*) для последовательной схемы замещения конденсаторов типа К71-4-160-10,0.

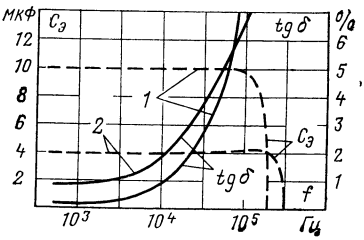


Рис. 3-10. Расчетная зависимость от частоты эквивалентной емкости и $\operatorname{tg}\delta$ конденсаторов типов К-71-4-160-10,0 (*1*); К42-15-630-40 (*2*).

(см. табл. 3-2), т. е.

$$r_\Sigma = r'_\Sigma + r''_\Sigma(\omega). \qquad (3\text{-}14)$$

Поскольку через все эти сопротивления протекает один и тот же ток (рабочий ток конденсатора), при увеличении частоты возрастает доля потерь в токоведущих частях (быстрее в выводах и контактном узле, где проявляется поверхностный эффект, и медленнее в обкладках) и падает доля потерь в диэлектрике.

На частоте первого собственного резонанса, т. е. при $\omega = \omega_p = 1/\sqrt{L_э C_s}$ конденсатор становится эквивалентным чисто активному сопротивлению, а потери в токоведущих частях при этом пропорциональны $\dfrac{r_\Sigma(\omega_p)}{r_\Sigma(\omega_p) + r_s(\omega_p)}$. Поскольку $r_\Sigma(\omega_p) \gg r_s(\omega_p)$, практически все потери в этом режиме сосредоточены в токоведущих частях. На рис. 3-9 показаны частотные зависимости параметров последовательной схемы замещения конденсаторов типа К71-4.

Для оценки максимальной частоты, до которой конденсатор может применяться, представляет интерес анализ частотной зависимости эффективной емкости $C_э$, сопротивления потерь $R_э$ и $\operatorname{tg}\delta$, определяющих реактивную и активную мощности конденсатора. С этой целью необходимо перейти от последовательной схемы замещения (рис. 3-8,*а*) к эквивалентной ей параллельной схеме замещения (рис. 3-8,*б*), используя соотношения, приведенные в табл. 3-1. Эффективная емкость и сопротивление потерь конденсатора на частоте ω равны:

$$\left.\begin{aligned} C_э &= \frac{C_{sэ}(\omega)}{1+[\omega(r_\Sigma(\omega)+r_s(\omega))\,C_{sэ}(\omega)]^2}; \\ R_э &= \frac{1+[\omega(r_\Sigma(\omega)+r_s(\omega))\,C_{sэ}(\omega)]^2}{[\omega(r_\Sigma(\omega)+r_s(\omega))\,C_{sэ}(\omega)]^2}\,r_s(\omega), \end{aligned}\right\} \quad (3\text{-}15)$$

где $C_{sэ}$ определяется соотношением (3-11).

Тангенс угла потерь в схеме на рис. 3-8,*б* определяется выражением (3-2), т. е. $\operatorname{tg}\delta = 1/\omega C_э R_э$. В зависимости от соотношения между r_Σ и волновым сопротивлением, равным $\sqrt{L_э/C_э}$, частотная характеристика емкости $C_э$ может иметь монотонный и немонотонный характер (рис. 3-10). Сопротивление потерь $R_э$ уменьшается с ростом частоты до значения $R_э = r_э(\omega_p) \approx r_\Sigma(\omega_p)$ при $\omega = \omega_p$. При частоте $\omega = \omega_p$ тангенс угла потерь стремится к бесконечности (физически это означает, что реактивная мощность, которую генерирует диэлектрик, компенсируется реактивной мощностью, которую потребляют индуктивные сопротивления элементов конструкции конденсатора). При частоте $\omega = \omega_p$ конденсатор превращается в чисто активное сопротивление, а при $\omega > \omega_p$ он становится активно-индуктивным сопротивлением.

В силу того что секция конденсатора, как упоминалось выше, представляет собой систему с распределенными параметрами, схема замещения которой для конденсатора представляет объемную цепную схему, при дальнейшем увеличении частоты возможно возникновение других резонансов, однако обычно конденсаторы применяют на частотах ниже первой резонансной частоты. Как видно из данных табл. 3-2, частоты первого резонанса конденсаторов малой и средней мощности находятся в пределах 100—800 кГц, что существенно выше

тех частот, которые характерны для режимов работы конденсаторов в ТП.

Однако у конденсаторов большой мощности низкого напряжения, у которых как емкость, так и индуктивность значительно больше, чем у приведенных в табл. 3-2, частоты первого собственного резонанса, как показали расчеты и экспериментальные исследования, лежат в диапазоне 10^4—10^5 Гц, т. е. в том диапазоне частот, в котором могут находиться гармонические составляющие токов и напряжений ТП.

3-2. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ

Потери энергии и среднюю мощность потерь в конденсаторах можно рассчитать, используя схемы их замещения, а также определить экспериментальным путем. Так как тепловыделение в диэлектрике и токоведущих частях распределено по объему конденсатора неравномерно, то для нахождения температурного поля конденсатора необходимо раздельное определение потерь (см. § 2-3).

Полная средняя мощность потерь энергии в конденсаторе равна сумме потерь в диэлектрике и металлических частях [1]:

$$P=P_д+P_м. \tag{3-16}$$

Средняя за период мощность потерь в диэлектрике конденсатора в длительном режиме работы находится по следующей формуле:

при параллельной схеме замещения

$$P_д=U^2/R_p; \tag{3-17}$$

при последовательной схеме замещения

$$P_д=I^2r_s, \tag{3-18}$$

где U, I — действующие значения напряжения и тока, воздействующих на диэлектрик.

Учитывая, что

$$R_p=1/\omega C_p \operatorname{tg}\delta_д(\omega)$$

и

$$r_s=\operatorname{tg}\delta_д(\omega)/\omega C_s(\omega),$$

[1] Потерями в корпусной изоляции пренебрегаем ввиду их малости по сравнению с остальными составляющими.

формулы (3-17) и (3-18) принимают хорошо известный вид:

$$P_{д}=U^2\omega C_p \operatorname{tg}\delta_{д}(\omega); \tag{3-19}$$

$$P_{д}=I^2 \operatorname{tg}\delta_{д}(\omega)/\omega C_s(\omega), \tag{3-20}$$

где $\operatorname{tg}\delta_{д}(\omega)$ тангенс угла потерь диэлектрика на частоте ω; C_p — емкость конденсатора на частоте ω.

При малых значениях $\operatorname{tg}\delta$, характерных для конденсаторных диэлектриков ($\operatorname{tg}\delta<10^{-1}$), емкость C_s практически равна C_p (см. соотношение между C_s и C_p в табл. 3-1). Мощность потерь энергии в токоведущих частях конденсатора можно вычислить следующим образом:

$$P_{м}=U^2\omega C_p \operatorname{tg}\delta_{м}(\omega), \tag{3-21}$$

где

$$\operatorname{tg}\delta_{м}(\omega)=\omega C_s r_{\Sigma}(\omega). \tag{3-22}$$

Подставляя значения составляющих потерь в (3-16) из (3-20) и (3-21), получаем:

$$P=I^2\left[r_s(\omega)+\sum_{j=1}^{n} r_j(\omega)\right]=I^2\left[r_s(\omega)+r_{\Sigma}(\omega)\right]. \tag{3-23}$$

Полную мощность потерь в конденсаторе можно определить следующим образом:

$$P=U^2\omega C_{э}(\omega) \operatorname{tg}\delta_{э}(\omega), \tag{3-24}$$

здесь $C_{э}(\omega)$, $\operatorname{tg}\delta_{э}(\omega)$ — емкость и тангенс угла потерь всего конденсатора на частоте ω.

В области частот, далекой от первой резонансной частоты конденсатора, $C_{э}(\omega)\approx C_{н}=\text{const}$, т. е. эффективная емкость равна его номинальной емкости.

При сложном длительном режиме, т. е. когда происходит изменение воздействующего напряжения или частоты, средняя за интервал времени T_1 мощность потерь энергии определяется известным выражением

$$P=\sum_{i=1}^{m} P_i \frac{t_i}{T_1}, \tag{3-25}$$

где P_i — средняя мощность на интервале времени t_i, на котором параметры воздействующего на диэлектрик напряжения могут считаться неизменными; m — число таких интервалов.

Значения P_i при этом рассчитываются по (3-19). По (3-25) можно рассчитать также мощность тепловыделения в конденсаторном диэлектрике в повторно-кратковременном режиме.

У конденсаторов, для которых характерна сильная зависимость $\operatorname{tg}\delta_д$ от температуры и частоты (конденсаторы с полярным диэлектриком), необходимо учитывать эту зависимость при расчетах P_i, если t_i соизмеримы или больше тепловой постоянной времени конденсатора (см. § 2-3). В тех случаях, когда $t_i \ll \tau_T$, зависимость $\operatorname{tg}\delta_д$ от температуры можно учесть приближенно по средней за интервал T_1 мощности потерь.

В качестве примера рассмотрим определение мощности потерь энергии и максимальной температуры внутри конденсатора К71-4 $C_н$=10,0 мкФ, $U_н$=160 В при T_0=65°С и f=10^3 Гц.

1. Определяем активное сопротивление металлических частей конденсатора r_Σ на частоте $f = 10^3$ Гц, используя данные табл. 3-2

$$r_\Sigma(10^3) = 7{,}5\cdot10^{-3} + 6{,}2\cdot10^{-6}\sqrt{10^3} = 7{,}7\cdot10^{-3}\ \text{Ом}.$$

2. Тангенс угла потерь $\operatorname{tg}\delta_м = 2\cdot\pi\cdot10^3\cdot10\cdot10^{-6}\cdot7{,}7\cdot10^{-3} = 4{,}8\cdot10^{-4}$.

3. Тангенс угла потерь диэлектрика конденсаторов типа К71-4 составляет около $5\cdot10^{-4}$ [2-4].

4. Тангенс угла потерь всего конденсатора равен $\operatorname{tg}\delta = 9{,}8 \times 10^{-4}$.

5. Мощность тепловыделения в конденсаторе $P = U^2\cdot2\pi f\cdot C\cdot\operatorname{tg}\delta = (160/\sqrt{2})^2\cdot2\pi\cdot10^3\cdot10\cdot10^{-6}\cdot9{,}8\cdot10^{-4} = 0{,}79$ Вт.

6. Максимальная температура внутри конденсатора $T_{max} = T_0 + PR_{max} = 65 + 0{,}79\cdot13{,}2 = 75{,}4$°С, которая меньше допустимой, равной 85—90°С. Значение R_{max}=13,2°С/Вт взято из табл. 2-1.

3-3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОНДЕНСАТОРОВ

Конденсаторы достаточно часто работают в ТП в режимах, отличающихся от номинальных или нормируемых в технических условиях, в частности могут быть отличия в напряжении, частоте, условиях охлаждения, ресурсах и т. д.

Конденсаторы почти всех типов могут быть применены в ТП при соответствующем выборе номинальной емкости и схемы соединения конденсаторов в блоке, однако массо-габаритные характеристики конденсаторов различных типов и батарей из них, а также технологичность изготовления батарей в зависимости от условий применения могут существенно изменяться. Наилучшие

характеристики обычно достигаются при применении конденсаторов современных типов, специально разработанных для заданных условий эксплуатации.

Вместе с тем, очевидно, что нецелесообразно разрабатывать и изготовлять специальные конденсаторы для каждого нового сочетания этих условий.

Задачи получения минимальных массо-габаритных характеристик конденсаторного оборудования ТП и обеспечения максимальной надежности взаимно противоречивы, поскольку наилучшие удельные характеристики конденсаторов достигаются при максимально допустимых нагрузках, которые обусловливают резкое сокращение их срока службы, поэтому на практике приходится решать задачу максимального использования конденсаторов при условии получения заданной надежности.

Определение допустимого рабочего напряжения на конденсаторах необходимо для следующих целей: построения температурно-частотных зависимостей удельных характеристик конденсаторов различных типов, используемых при сопоставлении вариантов и выборе оптимального, а также для определения необходимой номинальной емкости конденсатора и схемы соединения конденсаторов в батарее, которые обеспечивают в заданных условиях эксплуатации необходимый ресурс, срок службы и надежность.

На практике бывает необходимо проверить допустимость заданных условий эксплуатации при упрощенном выборе конденсатора, например для каждого конденсатора в случае, когда данный тип конденсаторов имеет малое число номинальных емкостей.

Таким образом, обычно стоит задача определения предельно допустимых параметров воздействующего напряжения (его значения или частоты) для заданного конденсатора, условий охлаждения и ресурса, причем последние могут быть такими же, как в номинальном режиме, или отличаться от него. При синусоидальном напряжении основными формами старения конденсаторов являются тепловое и ионизационное старение. В связи с этими главными факторами, определяющими предельно допустимые параметры рабочего напряжения, являются: тепловыделение в конденсаторе и обусловленная им и охлаждением максимальная температура элементов его конструкции, а также мощность ионизационных процессов (мощность частичных разрядов), опреде-

ляющая скорость ионизационного старения, т. е. должны выполняться неравенства

$$T_{max} \leqslant (T_{max})_д; \qquad (3\text{-}26)$$

$$P_{ч.р} \leqslant (P_{ч.р})_д, \qquad (3\text{-}27)$$

где T_{max}, $P_{ч.р}$ — соответственно максимальная температура и мощность частичных разрядов в конденсаторе в расчетном режиме.

В правой части (3-26), (3-27) находятся допустимые для заданного ресурса или срока службы значения температуры и мощности.

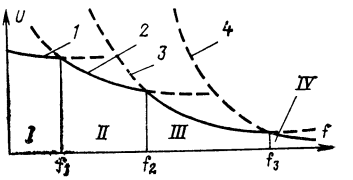


Рис. 3-11. Зависимость допустимого рабочего напряжения на конденсаторе от частоты при неизменном сроке службы.

1 — мощность частичных разрядов постоянна; *2* — допустимая мощность тепловыделения постоянна; *3* — действующее значение тока постоянно; *4* — максимально допустимая температура крышки, контактных узлов, выводов конденсатора постоянна.

На рис. 3-11 условно показана частотная зависимость предельно допустимого рабочего напряжения на конденсаторе от частоты при некоторой температуре охлаждающей среды и неизменном сроке службы.

Предельно допустимое рабочее напряжение, характер его изменения в разных зонах, размеры зон *I*—*IV* и их расположение на оси частот зависят от типа и номинальной емкости конденсатора, его конструкции, условий охлаждения, требуемого ресурса или срока службы, давления охлаждающей среды и ряда других факторов. Например, при ухудшенных условиях охлаждения (при повышенной температуре охлаждающей среды, плотном расположении конденсаторов в батарее и т. д.) зона *III* несколько расширяется и т. д.

Полагая, что в конденсаторе преобладающим является тепловой механизм старения, предельно допустимое рабочее напряжение в зоне *II* (рис. 3-11) равно:

$$U'_1 = \sqrt{\frac{T_{max} - T_0}{R_{max}\omega C \operatorname{tg}\delta}}, \qquad (3\text{-}28)$$

где T_{max} — максимально допустимая для данного типа конденсатора и ресурса τ_1 внутренняя температура; T_0 —

температура охлаждающей среды, R_{max} — тепловое сопротивление конденсатора; $\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла потерь конденсатора на частоте ω при средней внутренней температуре (см. § 2-3).

Максимально допустимая температура внутри конденсатора зависит в основном от его конструкции, типа диэлектрика и требуемого ресурса. Так, фольговые бумажно-масляные конденсаторы допускают температуру T_{max}=60÷70°С, тогда как у конденсаторов с пропиткой хлорированными жидкостями T_{max} может составлять от 90 до 120°С [П-3, 2-9]. Максимальная внутренняя температура конденсаторов с пленочным диэлектриком ориентировочно равна 60—70°С (для полистирола), 80—90°С (для сополимера полистирола), 80—110°С (для полипропилена), 90—150°С (для фторопласта) и т. д. [2-4].

У конденсаторов с сильной зависимостью $\operatorname{tg}\delta$ от температуры допустимое напряжение в зоне *II* может ограничиваться из условия создания определенного запаса $P_д = kP_{кр}$, где $k<1{,}0$; $P_{кр}$ — мощность тепловыделения в критическом режиме (см. § 2-3).

Коэффициент запаса k зависит от временного изменения произведения $C\operatorname{tg}\delta$ (чем быстрее увеличивается это произведение, тем меньше необходимо брать k).

Например, для конденсаторов МБГЧ значение k может быть принято равным 0,7 для $\tau_{\gamma=90\%} = 10^4$. Из двух значений напряжений U'_1, определяемых по (3-28) и $U''_1 = \sqrt{kP_{кр}/\omega C\operatorname{tg}\delta}$, берется меньшее. В этих формулах $\operatorname{tg}\delta$ берется для конденсатора на частоте ω при средней температуре $T_{ср}$.

В зоне *I* (рис. 3-11) предельно допустимое рабочее напряжение приближенно равно:

$$U_2 = U'_2 \sqrt[c]{\frac{\tau'}{\tau}\left(\frac{f'}{f}\right)^n}, \qquad (3\text{-}29)$$

где U'_2 и f' — напряжение и частота, при которых известен срок службы конденсатора τ' при ионизационном механизме старения.

Значения c и n в (3-29) зависят от конструкции конденсатора ($n\approx 0{,}6\div 1$, $c=4\div 6$ для пленочных конденсаторов, $c=5\div 8$ для бумажных конденсаторов).

Выражение (3-29) получено в предположении неизменности полной энергии частичных разрядов за весь

срок службы (см. § 2-2). В качестве базового режима (U'_2 и f') обычно может быть принят номинальный режим.

Допустимое рабочее напряжение должно выбираться также из условия обеспечения определенного запаса по кратковременной электрической прочности конденсаторов, для чего должны быть известны характеристики снижения напряжения со временем (см. § 2-4) и частотой. Известно, что вследствие роста интенсивности частичных разрядов электрическая прочность бумажно-масляного диэлектрика с ростом частоты от 50 Гц до 10^4 Гц падает более чем в 2 раза [П-1, П-3]. Электрическая прочность зависит также от температуры в конденсаторе, что необходимо учитывать при оценке допустимого напряжения, особенно при малых τ_γ.

При наличии перенапряжений на конденсаторе они не должны достигать значений, при которых в изоляции конденсатора возникают критические частичные разряды (см. § 2-2), если перенапряжения относительно продолжительны (минуты, десятки секунд). При кратковременных перенапряжениях (доли, единицы секунд) конденсаторы с бумажной, бумажно-пленочной изоляцией и жидкой пропиткой могут допускать перенапряжения, вызывающие критические частичные разряды, однако при этом рабочие напряжения не должны приводить к существованию устойчивых начальных частичных разрядов.

Практически предельно допустимое значение кратковременных перенапряжений можно определить, ориентируясь на испытательное напряжение для данного типа конденсатора.

Практически в зонах *I* и *II* следует принимать за допустимое рабочее напряжение в длительном режиме номинальное напряжение (для конденсаторов с синусоидальной формой напряжения в номинальном режиме). Если в номинальном режиме напряжение конденсатора несинусоидально, то за допустимое можно принять напряжение

$$U_з = U_{п.п}/2\sqrt{2}, \qquad (3\text{-}30)$$

где $U_{п.п}$ — полный размах переменной составляющей напряжения на конденсаторе в номинальном режиме.

Очевидно, что если в номинальном режиме конструкция конденсатора была определена не из условий

обеспечения длительной электрической прочности или запаса по кратковременной электрической прочности, то (3-30) обусловит занижение допустимого рабочего напряжения в зоне *I* и *II* (рис. 3-11).

Заданный режим является для данного конденсатора допустимым, если выполняются следующие условия:

$$P' \leqslant P'', \tag{3-31}$$

где P' — мощность тепловыделения в конденсаторе в заданном режиме; P'' — максимально допустимая мощность потерь для данного конденсатора (в частном случае это может быть мощность в номинальном режиме с учетом допустимых длительных перегрузок);

$$I' \leqslant I'', \tag{3-32}$$

здесь I'' — наибольшее допустимое для данного конденсатора действующее значение тока, с учетом допустимых длительных перегрузок);

$$U' \leqslant U'', \tag{3-33}$$

где U' — действующее значение напряжения в заданном режиме; U'' — номинальное напряжение конденсатора, если в номинальном режиме напряжение синусоидально; если в номинальном режиме напряжение несинусоидально, оно определяется по (3-30).

Применяя знак равенства в (3-31)—(3-33), можно рассчитать и построить для данного конденсатора частотные зависимости допустимого напряжения (используя наименьшие из трех значений напряжений, т. е. строя сплошную кривую рис. 3-11).

Такой подход является приближенным, поскольку не учитываются индивидуальные характеристики конденсаторов, в частности частотная зависимость $\operatorname{tg}\delta$, зависимость теплового сопротивления конденсатора от режима, а также зависимость длительной и кратковременной электрической прочности от частоты.

В [3-13, 3-14] излагается подход, позволяющий находить допустимое напряжение в относительных единицах, требующий, однако, определенных сведений о конструкции и характеристиках конденсаторов, а именно относительной доли потерь в металлических частях конструкции в номинальном режиме и др.

Более полное использование конденсаторов обеспечивает применение для расчетов (3-28) и (3-29), однако

в этом случае необходимы детальные сведения о характеристиках конденсаторов, в частности зависимости тепловых сопротивлений от режима работы, максимальной допустимой температуре внутри конденсатора, допустимом действующем значении тока, критической мощности тепловыделения и т. д.

В качестве примера на рис. 3-12 приведены частотные зависимости допустимого рабочего напряжения си-

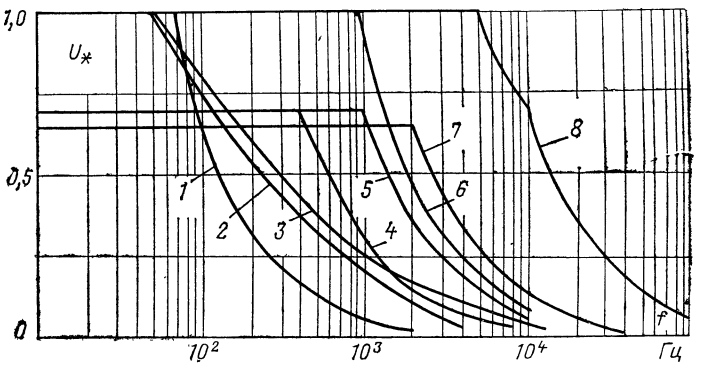


Рис. 3-12. Частотные зависимости допустимого рабочего напряжения синусоидальной формы на конденсаторах.
1 — ЛСМ400-7,8; *2* — МБГЧ750-2; *3* — К75-10-500-3,3; *4* — ГСТ-50У2; *5* — К75-31-300-10,0; *6* — К77-5-500-3,3; *7* — К71-4-160-10,0; *8* — К72-11-500-3,3.

нусоидальной формы в длительном режиме для некоторых типов конденсаторов при номинальных сроке службы и условиях охлаждения.

При этом $U_*=U_д/U_н$, где $U_д$ — допустимое рабочее напряжение, $U_н$ — номинальное. Иногда подобные зависимости приводятся для групп конденсаторов, объединенных по номинальной емкости.

Так как заранее неизвестно, какой фактор является определяющим при оценке допустимых параметров рабочего напряжения, то из нескольких расчетных значений окончательно берется минимальное значение.

Пример. Требуется найти допустимое напряжение на одиночном конденсаторе ЛСМ-400-3,8 при следующих условиях: частота 200 Гц, температура охлаждающей среды $T_0=+60°C$, режим простой длительный, требуемый срок службы $\tau=10^4$ ч. Принимая

T_{max}=90°C, согласно (3-28) и данным табл. 2-1 ($\operatorname{tg}\delta=5\cdot10^{-3}$), находим:

$$U_1=\sqrt{\frac{90-60}{5{,}6\cdot2\pi\cdot200\cdot3{,}8\cdot10^{-6}\cdot5\cdot10^{-3}}}=474\text{ В}.$$

Согласно (3-29)

$$U_2=400\sqrt[6]{\left(\frac{50}{200}\right)^{0{,}8}}\approx340\text{ В}.$$

Применяя (3-30), находим:

$$U_3=\frac{1{,}4\cdot400\cdot2\pi50\cdot3{,}8\cdot10^{-6}}{2\pi\cdot200\cdot3{,}8\cdot10^{-6}}=140\text{ В}.$$

Здесь 1,4 — коэффициент допустимой длительной перегрузки по току конденсаторов ЛСМ [3-15]. Фактически конденсаторы ЛСМ-400-3,8, как показали экспериментальные исследования, допускают существенно большую нагрузку по току (примерно $3I_н$), т. е. можно считать, что $U_3=\frac{3}{1{,}4}\cdot140=300$ В. Окончательно принимаем допустимое рабочее напряжение равным $U_д$=300 В.

В сложных режимах нагружения возможны два основных случая: первый, в котором внутренняя температура конденсатора не претерпевает существенных колебаний (в случае интервалов нагружения и пауз существенно меньших, чем тепловая постоянная времени конденсатора), и второй, когда эта температура может колебаться в широких пределах.

В первом случае полностью могут быть применены подходы, изложенные выше, т. е. можно пользоваться эквивалентной средней мощностью.

Во втором случае необходимо ограничивать максимальную температуру и ее колебания не только из условия обеспечения определенной скорости термического старения, поскольку в этом случае диэлектрик старится медленнее из-за меньшей эквивалентной температуры, но и из условий обеспечения определенной циклостойкости конденсаторов, т. е. обеспечения определенной скорости старения контактных узлов вследствие термомеханических напряжений, а также из условий обеспечения запаса по кратковременной электрической прочности при пиках температуры в конденсаторе.

В повторно-кратковременных режимах наличие пауз в работе уменьшает вредное воздействие частичных разрядов; приближенно допустимость режима может быть

оценена с помощью (3-29), если принять τ равным сумме интервалов нагружения.

Выше предполагалось, что характеристики конденсатора, условия охлаждения и т. д. неизменны во времени. Однако на практике это не так. Тепловыделение в конденсаторе обычно растет со временем из-за роста $\operatorname{tg}\delta$, температура охлаждающей среды меняется, могут изменяться со временем также тепловые сопротивления конденсаторов.

В § 2-4 изложена определенная возможность учета влияния некоторых нестабильных факторов на срок службы t_Φ. Из уравнения (2-65) при заданном t_Φ и законах изменения во времени $T_0(t)$ и $\operatorname{tg}\delta(t)$ можно найти рабочее напряжение, при котором обеспечивается требуемый срок службы.

Второй особенностью, которую следует учитывать при определении допустимых параметров воздействующего напряжения, является то, что параметры конденсаторов являются случайными величинами, т. е. для правильного выбора необходимо иметь распределение этих величин, а также изменения параметров распределения с течением времени в зависимости от условий эксплуатации.

3-4. ВЫБОР КОНДЕНСАТОРОВ

Выбор оптимального значения номинальной емкости, типа конденсатора, схемы соединения и конструкции батареи является одной из основных задач при разработке ТП, поскольку от принятого решения в значительной мере зависят удельные характеристики, технологичность и надежность ТП.

Оптимальный вариант достигается при минимуме целевой функции

$$\Phi = b_1 V + b_2 M + b_3 L, \qquad (3\text{-}34)$$

где V, M, L — объем, масса и стоимость изготовления батарей конденсаторов; b_1, b_2, b_3 — коэффициенты, зависящие в основном от назначения ТП.

При этом необходимо выбрать такой тип, номинальную емкость конденсаторов и схему соединения их в батарее, при которых обеспечивается необходимая долговечность и безотказность конденсаторов.

Для сокращения объема вычислений целесообразно выполнять предварительный отбор типов конденсато-

ров — «кандидатов» на применение. Основанием для такого предварительного отбора служит такая исходная информация: электрический режим работы (напряжение, частота, продолжительность нагрузки, возможные перегрузки, их продолжительность, частота появления и т. д.); условия охлаждения (способ охлаждения, температура охлаждающей среды и т. д.); механические воздействия (вибрации, удары, ускорения и т. д.); воздействия окружающей среды (пыль, влага, радиация, давление и т. д.); необходимая емкость или реактивная мощность, требуемая точность емкости и ее допустимый дрейф во времени; специальные требования по монтажу, пожаровзрывобезопасности и т. д.; показатели надежности, в первую очередь долговечности. Для предварительного отбора конденсаторов можно использовать сведения, содержащиеся в ТУ, справочниках, а также приведенные в § 3-5 и табл. П-1 и П-2 данной книги.

Для получения минимальных массо-габаритных характеристик конденсаторного оборудования следует выбирать конденсаторы с наибольшими для заданных условий работы удельными реактивными мощностями (см. § 3-5).

В диапазоне частот до 200 Гц следует применять конденсаторы с полярными диэлектриками (бумажные: МБГЧ, серии К40, К41, К75, К73, ЛСМ, ЛСЕ и др.); на более высоких частотах — конденсаторы с комбинированным диэлектриком (например, серии К75) и со слабополярным диэлектриком (серии К77). На частотах, начиная примерно с 10^3 Гц, целесообразно применение конденсаторов с неполярным пленочным диэлектриком (К71, К72 и др.).

Конденсаторы с пленочным диэлектриком и фольговыми обкладками имеют наименьшую температурную зависимость емкости и $\operatorname{tg}\delta$.

В меньшей степени, чем у бумажных конденсаторов, на этих параметрах отражаются температурные циклы и продолжительность эксплуатации. Вместе с тем, большинство пленочных конденсаторов более чувствительны к разрушающему воздействию частичных разрядов, в связи с чем для них недопустимы длительные нагрузки, вызывающие даже начальные частичные разряды. Электрическая прочность пленочных конденсаторов с диэлектриком из полистирола и его сополимеров, фто-

ропласта в среднем выше, чем у бумажных конденсаторов таких же габаритов и такой же номинальной емкости, однако она имеет большой разброс [2-4].

В ТП, где возможны частые перенапряжения, целесообразно применять конденсаторы с комбинированным бумажно-пленочным диэлектриком, поскольку они обладают и повышенной электрической прочностью и большей стойкостью к частичным разрядам (типов КСК, ПСК, К75-10 и др.).

Следует учитывать, что с ростом внутренней температуры и частоты воздействующего напряжения у большинства типов конденсаторов электрическая прочность падает [П-1, П-3].

В ТП в настоящее время широко применяются конденсаторы с металлизированными обкладками (МБГЧ — металлобумажный, герметизированный, частотный и К75-10 — бумажно-лавсановый). Конденсаторы широкого назначения К75-10 по своим характеристикам превосходят МБГЧ. Конденсаторы с металлизированными обкладками в определенной степени «устойчивы» к перенапряжениям, поскольку при возникновении пробоя часть обкладки вокруг места короткого замыкания испаряется, а само это место «самоизолируется» от «исправной» части секции.

Большое число актов «самовосстановления» приводит к ухудшению параметров и характеристик конденсаторов, в частности к росту $\operatorname{tg}\delta$, усилению его температурной зависимости, снижению емкости и сопротивления утечки [2-12] и в конечном итоге к тепловому пробою конденсатора.

В связи с этим допустимо ограниченное число этих актов, зависящее от типа конденсатора и условий работы.

Поскольку, кроме вариантов по типам конденсаторов, обычно имеются варианты по их номинальной емкости и схеме соединения в батарее, то далее выбор оптимального варианта целесообразно осуществлять следующим образом.

1. Осуществляется упрощенный выбор номинальной емкости конденсаторов и схемы соединения их в батарее с учетом зависимости допустимого напряжения, приводимой в ТУ либо рассчитанной по формулам § 3-3. Условием правильного выбора является выполнение с минимальным запасом неравенства $U \leqslant U_д$, где U —

напряжение, воздействующее на единичный конденсатор; $U_д$ — допустимое напряжение для условий, оговоренных в ТУ и т. д. Для упрощения конструкций батареи, ее технологичности в случае серийного производства ТП необходимо избегать последовательного включения большого числа единичных конденсаторов.

В случае, когда зависимости допустимого рабочего напряжения от его частоты и температуры охлаждающей среды неизвестны, для упрощенного выбора номинальной емкости конденсатора можно использовать следующие выражения, полученные из § 3-3:

$$R_{max}C_н \leqslant (T_{max}-T_0)/P^*; \qquad (3\text{-}35)$$

$$\left.\begin{aligned} U_{max} &\leqslant U_{п.п}/2; \\ I_д/C_н &\geqslant I^*, \end{aligned}\right\} \qquad (3\text{-}36)$$

где R_{max} — полное тепловое сопротивление конденсатора; T_{max} — максимальная допустимая рабочая температура внутри конденсатора (см. § 2-3); T_0 — максимальная температура охлаждающей среды; U_{max} — амплитуда заданного напряжения; $U_{п.п}$ — полный размах напряжения на конденсаторе в номинальном режиме; P^* — средняя мощность потерь энергии в конденсаторе данного типа для C=1,0 мкФ и в заданном электрическом режиме, т. е. $P^*=U^2\Omega 10^{-6}\operatorname{tg}\delta$; $I_{доп}$ — допустимое действующее значение тока для выбранного конденсатора; I^* — ток через конденсатор емкостью 1 мкФ, рассчитанный для заданного режима.

Если полное тепловое сопротивление R_{max} неизвестно, его можно приближенно вычислить по формуле $R_{max}=k/\alpha S_0$, где k=2,0 для крупногабаритных конденсаторов и k=1,6÷1,9 для малогабаритных конденсаторов; α — коэффициент теплоотдачи; S_0 — поверхность охлаждения.

Для облегчения выбора конденсатора целесообразно для всех конденсаторов составить таблицу, содержащую значения $R_{max}C_н$; U_{max} и $I_{доп}/C_н$.

Оптимальным можно считать тот конденсатор, для которого с минимальным запасом выполняются все условия (3-35) и (3-36).

Если условия (3-35) и (3-36) не выполняются, то необходимо последовательное включение двух или более

единичных конденсаторов. При этом необходимо пересчитать P^* и U_{max} по формулам

$$P^*=(U/n)^2\Omega\cdot 10^{-6}\operatorname{tg}\delta_{max}$$

и

$$U_{max}=U/n,$$

где n — число последовательно соединенных конденсаторов.

В случае малочисленности типов конденсаторов, например одного-двух, выбор осуществляется путем оценки допустимости для данного конденсатора заданного режима. Возможности приближенной оценки допустимости режима рассмотрены в § 3-3.

После упрощенного выбора типа, емкости конденсатора и схемы соединения в батарее, если запасы невелики, необходимо уточнить выбор: учесть влияние числа конденсаторов на их тепловое сопротивление при компоновке в батарею, а также уточнить максимальную температуру внутри конденсатора и запас по отношению к критической мощности тепловыделения выбранного номинала. Для этого рассчитывается мощность тепловыделения в единичном выбранном конденсаторе (см. § 3-2) и определяется полное тепловое сопротивление конденсаторов при их расположении в батарее заданной конфигурации (см. § 2-3). Применяя (2-25), находим T_{max}. Оптимальный вариант окончательно будет тот, для которого с минимальным запасом выполняется условие

$$T_{max}\leqslant T_{maxдоп}, \qquad (3\text{-}37)$$

где $T_{maxдоп}$ — максимальная температура внутри конденсатора, допустимая для заданного типа диэлектрика, конструкции и заданного срока службы конденсатора.

Для выбранного конденсатора проверяется также коэффициент запаса $k=P/P_{кр}$, где P — мощность тепловыделения в конденсаторе. Значение k должно быть не менее 1,3—1,5.

Здесь следует учесть, что критическая мощность тепловыделения должна определяться с использованием температурной зависимости $\operatorname{tg}\delta$ на частоте, которая задана для режима.

Кроме того, необходимо, чтобы удовлетворялось условие (3-32). Для облегчения выбора конденсатора удобно в табличной форме представить допустимые для дан-

ных условий охлаждения и ресурсов удельные действующие значения тока для каждого из конденсаторов, которые при выборе сопоставляются с расчетным значением $I^*=I/C_н$.

Так как, кроме мощности тепловыделения, работоспособность и долговечность конденсаторов определяют частичные разряды, для надежной работы выбранных конденсаторов должно выполняться условие (3-33).

Из всех найденных конденсаторов окончательно берется тот, у которого большее номинальное напряжение, а при равных напряжениях меньшая емкость.

При уточнении номинальной емкости единичного конденсатора батареи может потребоваться изменение номинальной емкости, напряжения, а также числа последовательно включенных конденсаторов. Для лучшей равномерности деления напряжения между отдельными конденсаторами предпочтительнее применять их параллельно-последовательное соединение.

После окончательного выбора конденсатора данного типа определяются масса, объем и стоимость изготовления конденсаторной батареи, а затем по (3-34) значение целевой функции. Произведя оптимизацию батарей из конденсаторов других типов — «кандидатов» на применение и сопоставив целевые функции батарей, составленных из конденсаторов различных типов, выбираем оптимальную, имеющую минимальную целевую функцию Ф (3-34).

Пример. Необходимо выбрать тип и номинальную емкость конденсаторов для батареи общей емкостью 250 мкФ для следующих условий: U=230 В; f=400 Гц; T_0=60°С; $\tau=2\cdot10^4$ ч; b_1==0,4 1/дм^3; b_2=0,6 1/кг; b_3=0.

В соответствии с данными табл. П-1 и П-2 следует рассмотреть применение в приведенных условиях следующих типов конденсаторов: ЭСК; К75-10; К75-31; К77-5; ПС-0,3-0,4.

1. Выберем номинальные емкости конденсаторов, удовлетворяющие заданным условиям. Оценим работоспособность конденсаторов.

а) Выбираем наиболее близкий к заданным U и f конденсатор ЭСК-0,5-0,5, имеющий $Q_н$=100 квар, откуда

$$C=\frac{100\cdot10^3}{500^2\cdot2\pi\cdot500}=127 \text{ мкФ}.$$

Тогда в заданном режиме

$$Q=230^2\cdot2\pi\cdot400\cdot127\cdot10^{-6}=17 \text{ квар}.$$

Используя (2-25) в виде $T_{max}=T_0+Q \operatorname{tg}\delta R_{max}$, находим, что максимальная допустимая реактивная мощность при T_0=60°С рав-

на 60 квар, что больше 17 квар, найденных выше, т. е. и заданный режим допустим. Количество конденсаторов в батарее

$$N_а=250/127\approx 2 \text{ шт.}$$

б) Номинальную емкость конденсатора К75-10 выбираем в соответствии с [3-16]: при $T_0=60°C$ и $\tau=2\cdot10^4$ ч, допустимое напряжение $U_*=0{,}34$. Тогда требуемое номинальное напряжение $U_н\geqslant U/U_*=230/0{,}34=680$ В. Выбираем К75-10-750-1,5.

Количество конденсаторов в батарее

$$N_б=250/1{,}5=167 \text{ шт.}$$

в) Проверим работоспособность конденсатора К75-31 ($C_н=10{,}0$ мкФ) в заданном режиме, использовав данные [3-17] и формулы (3-30)—(3-32). Согласно (3-30) допустимое значение $U=300\cdot2/2\sqrt{2}=212$ В, что меньше $U=230$ В, в силу чего применение конденсаторов К75-31 в заданных условиях недопустимо.

г) Номинальную емкость конденсатора К77-5 найдем, использовав (3-32), (3-35) и (3-36). Получим:

$$P^*=U^2\omega \operatorname{tg}\delta 10^{-6}=230^2\cdot2\pi\cdot400\cdot3\cdot10^{-3}\cdot10^{-6}=0{,}4 \text{ Вт/мкФ.}$$

Принимая для поликарбонатного диэлектрика $T_{max}=90°C$ [2-4], получаем $(T_{max}-T_0)/P^*=(90-60)/0{,}4=75°C\cdot$мкФ/Вт. Так как конструктивно конденсаторы К77-5 близки к конденсаторам К75-10, то используем значение R_{max} для конденсатора К75-10 (табл. 2-1). Тогда произведение $R_{max}C$ для конденсатора К77-5-250-4,7 приближенно равно $11\cdot4{,}7=52°C\cdot$мкФ/Вт, т. е. (3-35) удовлетворяется.

Условие (3-33) также удовлетворяется. Проверку выполнения условия (3-32) осуществим с учетом ПВ=20% в номинальном режиме. Номинальный ток

$$I_н=250\cdot2\cdot3\cdot10^3\cdot4{,}7\cdot10^{-6}=22 \text{ А.}$$

Допустимый ток в длительном режиме

$$I''=I_н\sqrt{\tau_р/T_ц}=22\sqrt{1/5}=10 \text{ А.}$$

Ток в заданном режиме

$$I'=230\cdot2\pi\cdot400\cdot4{,}7\cdot10^{-6}=2{,}7 \text{ А,}$$

т. е. (3-32) также выполняется. Применение конденсатора К77-5-250-4,7 в заданных условиях допустимо. Количество конденсаторов в батарее

$$N_г=250/4{,}7=53 \text{ шт.}$$

д) Для конденсатора ПС-0,3-04 необходима проверка условия (3-37), так как он разработан для $T_0=40°C$. Используя (2-25), находим, что T_{max} в заданных условиях приближенно равно:

$$T_{max}=60+230^2\cdot2\pi\cdot400\cdot50\cdot10^{-6}\cdot3\cdot10^{-3}\frac{2}{1\cdot10^{-3}\cdot965}\approx100°C,$$

где $\operatorname{tg}\delta=3\cdot10^{-3}$; $\alpha=1\cdot10^{-3}$ Вт/(см$^2\cdot$°C), поверхность охлаждения — 965 см^2.

В номинальных условиях

$$T_{max\ доп} = 40 + 300^2 \cdot 2\pi \cdot 400 \cdot 50 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \frac{2}{10^{-3} \cdot 965} = 108°C,$$

т. е. (3-37) выполняется.

Количество конденсаторов в батарее

$$N_д = 250/50 = 5 \text{ шт.}$$

2. Определим целевые функции для батарей из различных конденсаторов согласно (3-34):

$$Ф_а = 0{,}4 \cdot 2 \cdot 16 + 0{,}6 \cdot 2 \cdot 30 = 12{,}8 + 36 = 48{,}8;$$

$$Ф_б = 0{,}4 \cdot 167 \cdot 1{,}35 \cdot 0{,}225 + 0{,}6 \cdot 167 \cdot 0{,}5 = 20 + 50 = 70;$$

$$Ф_г = 0{,}4 \cdot 53 \cdot 1{,}35 \cdot 0{,}11 + 0{,}6 \cdot 53 \cdot 0{,}29 = 3{,}1 + 9{,}2 = 12{,}3;$$

$$Ф_д = 0{,}4 \cdot 5 \cdot 2{,}4 + 0{,}6 \cdot 5 \cdot 5{,}0 = 4{,}8 + 15{,}0 = 19{,}0.$$

Сопоставляя целевые функции для батарей, окончательно выбираем оптимальный вариант, имеющий целевую функцию 12,3, т. е. принимаем батарею из конденсаторов К77-5.

3-5. УДЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОНДЕНСАТОРОВ

На переменном синусоидальном токе основным удельным параметром конденсатора служит удельная реактивная мощность, т. е. мощность, отнесенная к объему, квар/м³, или к массе конденсатора, квар/кг:

$$\left.\begin{aligned} q_V &= U^2 \omega C/V; \\ q_M &= U^2 \omega C/M. \end{aligned}\right\} \qquad (3\text{-}38)$$

При экономических расчетах может понадобиться также удельная стоимость, квар/руб:

$$q_L = U^2 \omega C/L.$$

Удельные параметры конденсаторов используются для следующих целей: сопоставления конденсаторов различных конструкций и типов при выборе оптимального варианта; оценки объема, массы и стоимости конденсаторного оборудования ТП; определения оптимальной области применения по частоте и температуре.

Оценка объема, массы и стоимости конденсаторного оборудования обычно производится по параметрам, обратным удельным, т. е. $1/q_V$, м³/квар, $1/q_M$, кг/квар, $1/q_L$, руб/квар. По мощности конденсаторной батареи ее объ-

ем, массу и стоимость находят по следующим формулам:

$$\left.\begin{aligned} V &= Q\frac{1}{q_V}k_V;\\ M &= Q\frac{1}{q_M};\\ L &= Q\frac{1}{q_L}, \end{aligned}\right\} \qquad (3\text{-}39)$$

где k_V — коэффициент увеличения объема батареи из-за зазоров между конденсаторами.

Чем выше удельные параметры q_V, q_M, q_L, тем лучше конденсатор, поскольку при одной и той же реактивной мощности конденсатор с большими значениями q_V, q_M, q_L будет иметь меньший объем, массу и стоимость и наоборот.

Удельные параметры конденсаторов даже одного типа не являются постоянными, так как их реактивная мощность зависит от условий эксплуатации, которые определяют, в частности, допустимое рабочее напряжение (см. § 3-3). Очевидно, что удельные параметры конденсаторов должны также зависеть от частоты, напряжения, температуры охлаждающей среды, способа охлаждения, ожидаемого срока службы (или ресурса), конструкции батареи и, естественно, от конструкции и применяемых материалов (в первую очередь диэлектрика).

В связи с этим сопоставление конденсаторов различных типов по удельным параметрам будет правильным только при условии, что допустимое рабочее напряжение и допустимая реактивная мощность конденсаторов определяются для одних и тех же условий эксплуатации. Нельзя сравнивать, например, конденсаторы типа МБГЧ и силовые конденсаторы типа КС по удельным параметрам, рассчитанным для номинального режима, поскольку МБГЧ имеют $\tau=5\cdot10^3$ ч при $T_0=70°C$, а КС— $\tau>10^5$ и при $T_0=30°C$.

Вместе с тем, сопоставление различных конденсаторов по удельным параметрам можно производить, если они разработаны для одних и тех же или достаточно близких условий эксплуатации. Например, силовые конденсаторы различных типов, предназначенные для компенсации реактивной мощности в электроэнергетических

сетях промпредприятий, можно сопоставлять по номинальным удельным характеристикам.

Таким образом, следует различать удельные параметры конденсаторов в номинальном режиме эксплуатации (их значения указаны в табл. П-1, П-2) и удельные параметры в режимах, отличных от номинальных.

В общем случае для конденсаторов можно записать [1], что

$$q_V=[U(\tau, T_0, k_1, \omega, U_н, C_н, p)]^2\omega C/V, \qquad (3\text{-}40)$$

где $U(\tau, T_0, k_1, \omega, C_н, p)$ — допустимое рабочее напряжение для заданного сочетания требуемого срока службы (τ), температуры охлаждающей среды (T_0), частоты (ω), номинального значения емкости ($C_н$), давления (p) и условий охлаждения (k_1).

При $U=U_н$ и $\omega=\omega_н$ из (3-40) получаем удельные параметры для номинального режима.

Если известна зависимость допустимого рабочего напряжения от условий эксплуатации $U(\tau, T_0, k_1, C_н, \omega, p)$, то, применяя (3-40), можно построить зависимость q_V от любого из этих факторов, полагая остальные неизменными. При этом, естественно, режим работы конденсаторов может быть различным: длительным или повторно-кратковременным, простым или сложным.

Для практических целей разработчикам ТП наиболее необходимыми являются частотные зависимости удельных параметров в области температур $T_0=50\div 70$°С и сроков службы $\tau=10^4\div 5\cdot 10^4$ ч, характерных для ТП.

Рассмотрим зависимость удельной реактивной мощности конденсаторов от работы при синусоидальном напряжении. В области низких частот, когда допустимое рабочее напряжение конденсаторов определяется электрической прочностью и ионизационными процессами (зона *I* на рис. 3-11) удельная реактивная мощность конденсаторов изменяется примерно пропорционально частоте (поскольку $U\approx$const).

В зоне *II* (рис. 3-11), где допустимое напряжение определяется мощностью тепловыделения, удельная реактивная мощность изменяется пропорционально $1/\operatorname{tg}\delta$, т. е. в этой области удельная реактивная мощность либо

[1] Аналогично можно записать удельные параметры q_M и q_L.

постоянна, либо относительно слабо изменяется (в соответствии с частотной зависимостью $\operatorname{tg}\delta$).

В области *III* (рис. 3-11), в которой фактором, ограничивающим рабочее напряжение, является действующее значение тока, удельная реактивная мощность изменяется пропорционально $1/f$.

В зоне *IV*, где ограничения обусловлены неравномерностью распределения тока по секциям, сечению токо-

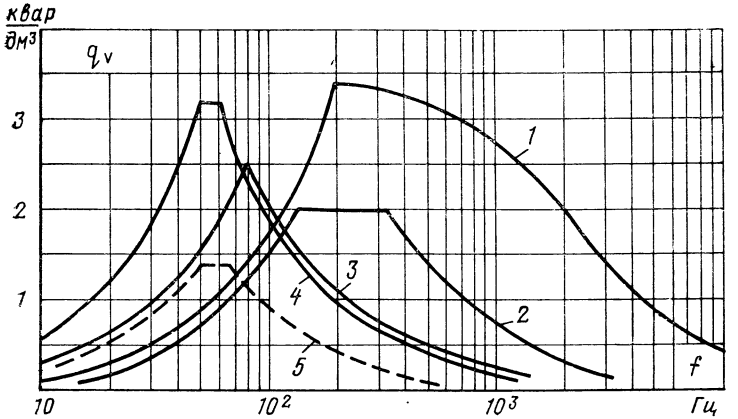


Рис. 3-13. Частотные зависимости удельной реактивной мощности одиночных конденсаторов при естественном воздушном охлаждении для $T_0=50°C$ и $\tau=2\cdot10^4$ ч.

1 — К75-10-250-10,0; *2* — МБГЧ250-10,0; *3* — ЛСМ-400-7,8; *4* — КСК-0,66-40; *5* — КС-0,38-18.

подвода и другими локальными явлениями, удельная реактивная мощность изменяется с частотой пропорционально $1/f\sqrt{f}$.

Ширина каждой из зон и их расположение по частоте зависят от тех же факторов, что и допустимое напряжение, т. е. от T_0, τ, $C_н$, $U_н$, условий охлаждения, давления окружающей среды и т. д.

На рис. 3-13 и 3-14 показаны зависимости q_V конденсаторов от частоты, рассчитанные для различных ресурсов, из которых видно изменение границ областей и значений q_V при разных τ. Наиболее существенно при этом изменяются характеристики конденсаторов с малыми номинальными сроками службы (МБГЧ, К75-10). Частотные зависимости удельных реактивных мощностей

позволяют определить области частот, в которых предпочтительно использование конденсаторов тех или иных типов и номинальных емкостей, а также сделать вывод о резервах или недоиспользовании конденсаторов, обусловленных конструкцией. Так, широкая зона с q=const свидетельствует о возможности эффективного применения конденсаторов на разных частотах в этой зоне. Увеличения q можно достигнуть введением принудительного охлаждения. Отсутствие этой зоны или малое ее зна-

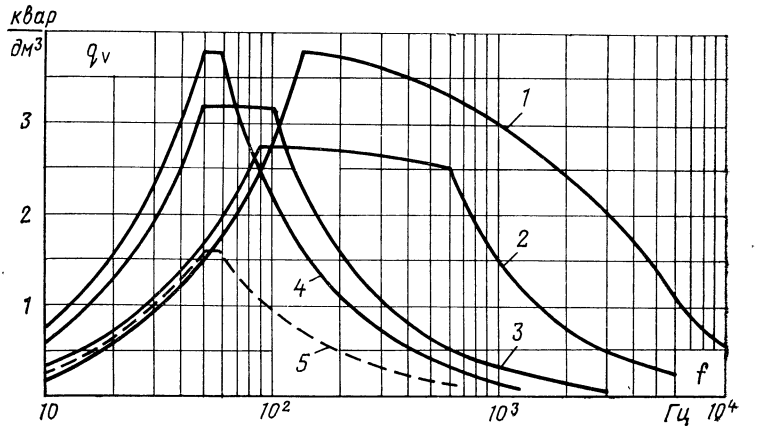


Рис. 3-14. То же, что на рис. 3-13, но при $\tau=5\cdot10^3$ ч.

чение говорит о том, что возможно улучшение удельных характеристик или расширение области эффективного применения за счет изменений конструкции, направленных на повышение допустимой токовой нагрузки конденсатора.

На рис. 3-15 приведены частотные зависимости удельных характеристик пленочных конденсаторов, демонстрирующие убедительное преимущество конденсаторов с полярными диэлектриками и влияние номинальной емкости.

При уменьшении номинальной емкости и $U_н$=const удельные характеристики в области частот зоны *I* идут ниже вследствие ухудшения заполнения объема конденсаторов активным диэлектриком. В зоне *II* характеристики конденсаторов с меньшей емкостью могут идти выше, чем у конденсаторов с большей емкостью, из-за

некоторого улучшения условий охлаждения и более высоких удельных токовых нагрузок.

Конденсаторы типов ГСТ и РСТ на синусоидальном напряжении имеют примерно такие же удельные характеристики, что и у КС или КСК.

Необходимо напомнить, что удельные характеристики батареи конденсаторов хуже удельных характеристик единичного конденсатора из-за неплотности монтажа.

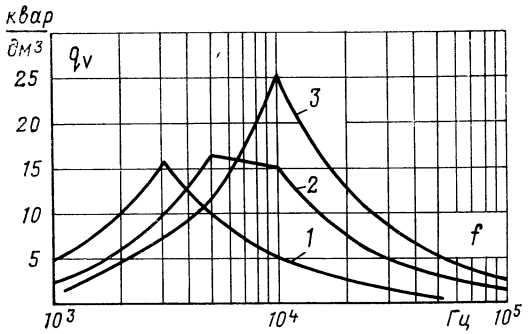


Рис. 3-15. Зависимость от частоты удельной реактивной мощности конденсаторов с пленочным диэлектриком.
1 — К71-4-160-10,0; *2* — К72-11-500-3,3; *3* — К72-11-250-1,0.

Поскольку у конденсаторов допустимое рабочее напряжение зависит от условий эксплуатации (T_0, p, f, τ и т. д.) и в ряде случаев для работы в ТП приходится выбирать их номинальное напряжение более высоким, чем рабочее, то целесообразно ввести понятие установленной мощности конденсаторов. Под установленной мощностью конденсаторов обычно понимают их номинальную мощность, т. е.

$$Q_y = U^2_н \omega_н C, \qquad (3\text{-}41)$$

где C — емкость всех конденсаторов батареи [1-47, 3-18, 3-19].

Для определения установленной мощности конденсаторов согласно принципам, изложенным в § 3-3, для заданных условий эксплуатации находится необходимый конденсатор по напряжению и емкости, а затем по приведенной выше формуле вычисляется Q_y, квар. По этой мощности, зная номинальные удельные параметры кон-

денсаторов выбранного типа, находят объем, массу и стоимость конденсаторной батареи непосредственно без расчета числа конденсаторов в батарее ($V=Q_y/q_V$, $M=Q_y/q_M$, $L=Q_y/q_L$).

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

РАБОТА КОНДЕНСАТОРОВ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ

4-1. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

При несинусоидальном напряжении на конденсатор воздействует обычно широкий спектр гармоник различных частот, поэтому здесь необходима эквивалентность схемы замещения и конденсатора в широком диапазоне частот. При наличии схем замещения можно будет решать такие важные для проектирования ТП вопросы, как расчет потерь энергии в конденсаторе, расчет электромагнитных процессов в цепях, содержащих конденсаторы, и т. д.

Схема замещения так же, как в случае синусоидального напряжения (см. § 3-1), должна строиться исходя из основных физических процессов, связанных с протеканием тока в металлических частях конструкции конденсатора и через его диэлектрик.

В связи с тем что методы расчета мощности потерь энергии базируются на представлении воздействующего напряжения в частотной и временно́й областях, параметры схем замещения для частотных методов могут быть как постоянными, так и частотно-зависимыми, тогда как для временны́х методов они должны быть только постоянными (см. § 4-2).

В § 3-1 показано, каким образом конденсатор можно представить эквивалентной схемой замещения с зависящими от частоты параметрами. При несинусоидальном напряжении, представленном с помощью гармонического анализа в виде некоторого спектра [4-1], такая схема замещения применяется для каждой из гармонических составляющих с параметрами, найденными по формулам § 3-1 на частотах этих составляющих. Такой подход достаточно удобен, поскольку применяются простые схемы замещения, но при этом, конечно, должны быть известны частотные зависимости параметров одной из этих схем.

Для построения схемы замещения конденсатора с постоянными параметрами в силу необходимости раздельного определения потерь в металлических частях конструкции и диэлектрике при несинусоидальном напряжении, так же как и при синусоидальном, нужна схема, моделирующая отдельно диэлектрик и металлические части конструкции, но уже с постоянными, не зависящими от частоты параметрами.

В соответствии с (2-13) диэлектрик эквивалентен параллельному соединению $n+2$ ветвей, первые две из которых являются активной проводимостью утечки и геометрической емкостью C_0, а последующие n ветвей представляют собой последовательные соединения емкостей C_i, индуктивностей L_i и активных сопротивлений R_i, соответствующих различным видам поляризации (рис. 4-1).

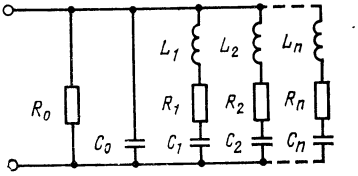


Рис. 4-1. Схема замещения диэлектрика в широком диапазоне частот с постоянными параметрами.

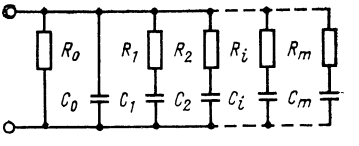


Рис. 4-2. Упрощенная схема замещения диэлектрика.

Для всех видов поляризации собственные частоты поляризуемых частиц ω_i лежат в пределах 10^{13}—10^{16} $с^{-1}$, что определяется малой массой, и следовательно, и малой инерционной силой поляризуемых частиц, поэтому в диапазоне частот, в котором конденсаторы используются на практике, значением $(\omega/\omega_i)^2$ в знаменателе выражения (2-13) можно пренебречь по сравнению с единицей, что позволяет упростить схему замещения, исключив из нее индуктивности L_i.

С учетом этого получаем упрощенную эквивалентную схему конденсаторного диэлектрика рис. 4-2, которая содержит R_0 — сопротивление конденсатора постоянному току (сопротивление утечки изоляции), которое обратно пропорционально удельной проводимости диэлектрика σ; C_0 — емкость конденсатора на весьма высокой частоте, условно называемой ω_∞, эта емкость учитывает геометрическую («вакуумного» конденсатора) емкость и практически мгновенные виды поляризации ($\tau_i < 10^{-10}$ с), значение C_0 пропорционально диэлектрической проницаемости $\varepsilon_\infty = \varepsilon(\omega_\infty) > \varepsilon_0$, площади обкладок S и обратно пропорционально толщине диэлектрика d; R_i, C_i — релаксаторы, соответствующие замедленным видам поляризации, которые в основном и вызывают потери энергии и нагрев диэлектрика конденсатора в переменном электрическом поле.

В реальных диэлектриках наблюдается непрерывный спектр параметров релаксаторов R_iC_i, ($n \longrightarrow \infty$), поэтому точная схема замещения диэлектрика должна содержать распределенные параметры, что, безусловно, осложняет ее построение, анализ и прак-

тическое использование. Наиболее простая аппроксимация функции распределения времен релаксации $f(\tau)$, приводящая к схеме замещения с сосредоточенными параметрами на рис. 4-2, получается в виде суммы функций Дирака [4-3, 4-4, 4-6]

$$f(\tau) \approx \sum_{i=1}^{m} \Delta\varepsilon_i \delta(\tau - \tau_i). \qquad (4\text{-}1)$$

Число элементов схемы замещения m существенно зависит от частотного диапазона, в котором требуется ее эквивалентность конденсаторному диэлектрику. Так, при синусоидальном напряжении достаточно двух элементов схемы замещения (см. § 3-1), при этом релаксаторы R_iC_i на фиксированной частоте могут быть заменены эквивалентными параллельными цепочками $R_{i\text{э}}$ и $C_{i\text{э}}$ и их можно преобразовать, включая R_0 и C_0, к одной паре $R_\text{э}$ и $C_\text{э}$. Такая же схема может быть использована и при узкополосном воздействующем напряжении. С увеличением ширины диапазона частот спектра воздействующего напряжения для обеспечения эквивалентности требуется включение двух или более релаксаторов. При этом сокращение их числа по сравнению со схемой замещения рис. 4-2, построенной для самого широкого спектра, может быть оправдано следующим. Комплексная проводимость цепочки R_iC_i равна:

$$Y = \frac{1}{R_i + (j\omega C_i)^{-1}} = \frac{j\omega C_i}{1 + j\omega\tau_i}, \qquad (4\text{-}2)$$

где $\tau_i = R_iC_i$, и если $\omega_{max}\tau_i \ll 1$, то такие релаксаторы имеют емкостную проводимость, которая может быть сложена с проводимостью ветви C_0, а в случае $\omega_{min}\tau_i \gg 1$ проводимость получается активной $1/R_i$ и она суммируется с проводимостью R^{-1}_0. Таким образом, схема замещения содержит только релаксаторы, у которых $\omega_{min} \ll 1/\tau_i \ll \omega_{max}$. Знаки $\gg$ или $\ll$ можно понимать как различие на порядок и более.

Определение параметров схемы замещения диэлектрика

Структура схемы замещения рис. 4-2 определяется физическими процессами поляризации. Параметры этой схемы C_0, R_0, C_i, R_i, $i=1, 2, \ldots, m$ определяются из условий совпадения (точнее, близости) операторного $Z(p)$ или комплексного $Z(j\omega)$ сопротивлений схемы замещения и конденсаторного диэлектрика.

Вместо операторного сопротивления $Z(p)$ обычно используют поддающиеся измерению переходные или частотные характеристики конденсаторных диэлектриков.

Переходные характеристики следует использовать при определении параметров весьма медленных процессов в конденсаторах, когда частотные методы встречают значительные трудности.

Обычно для конденсаторов измеряют значения емкости C и $\operatorname{tg}\delta$. Частотные зависимости C и $\operatorname{tg}\delta$ рассмотрены в § 3-1. Уменьшение емкости связано с ослаблением процессов поляризации при увеличении частоты. У конденсаторов с полярным диэлектриком наблюдается более сильная зависимость C и $\operatorname{tg}\delta$ от частоты, чем у неполярных.

К схеме замещения предъявляется очевидное требование совпадения ее частотных характеристик $C(\omega)$ и $\operatorname{tg}\delta(\omega)$ с характеристиками конденсаторного диэлектрика в полосе частот, для которой строится схема замещения.

Сопротивление R_0 обычно достаточно велико, и оно оказывает влияние на частотную характеристику $\operatorname{tg}\delta(\omega)$ лишь на очень низких частотах. На практике часто это сопротивление можно не учитывать.

Для схемы замещения рис. 4-2 можно записать входную комплексную проводимость в виде

$$Y = j\omega C_0 + R_0^{-1} + \sum_{i=1}^{m} \frac{\omega^2 \tau_i C_i}{(\omega\tau_i)^2 + 1} + \\ + j\omega \sum_{i=1}^{m} \frac{C_i}{(\omega\tau_i)^2 + 1}, \qquad (4\text{-}3)$$

где через $\tau_i = R_i C_i$ обозначены постоянные времени релаксаторов.

Из (4-3) можно выделить активную и реактивную составляющие проводимости

$$g(\omega) = R_0^{-1} + \sum_{i=1}^{m} \frac{\omega^2 \tau_i C_i}{1 + (\omega\tau_i)^2}; \qquad (4\text{-}4)$$

$$b(\omega) = \omega \left[C_0 + \sum_{i=1}^{m} \frac{C_i}{1 + (\omega\tau_i)^2} \right] = \\ = \omega C_0 \left[1 + \sum_{i=1}^{m} \frac{C_i / C_0}{1 + (\omega\tau_i)^2} \right] \qquad (4\text{-}5)$$

$$C(\omega)=C_0\left[1+\sum_{i=1}^{m}\frac{C_i/C_0}{1+(\omega\tau_i)^2}\right]. \qquad (4\text{-}6)$$

И для этой схемы замещения тангенс угла потерь

$$\operatorname{tg}\delta_{\text{с.з}}(\omega)=\frac{g(\omega)}{b(\omega)}=\frac{1}{\omega R_0 C_0\left(1+\sum_{i=1}^{m}\frac{C_i/C_0}{1+(\omega\tau_i)^2}\right)}+$$

$$+\sum_{i=1}^{m}\frac{\omega\tau_i C_i/C_0}{1+(\omega\tau_i)^2}\left(1+\sum_{i=1}^{m}\frac{C_i/C_0}{1+(\omega\tau_i)^2}\right)^{-1}. \qquad (4\text{-}7)$$

Если можно пренебречь суммой, стоящей в круглых скобках, по сравнению с единицей, т. е. считать, что емкость не зависит от частоты и равна C_0, формулу (4-7) можно упростить:

$$\operatorname{tg}\delta_{\text{с.з}}(\omega)=\frac{1}{\omega\tau_0}+\sum_{i=1}^{m}\frac{\omega\tau_i C_i/C_0}{1+(\omega\tau_i)^2}. \qquad (4\text{-}8)$$

Нетрудно заметить, что C_i/C_0 имеют тот же порядок, что и $\operatorname{tg}\delta(\omega_i)$, $\omega_i=1/\tau_i$, так что принятое допущение эквивалентно условию малости $\operatorname{tg}\delta$. Для неполярных диэлектриков значение C_0 практически равно измеренной на частоте Ω емкости образцов конденсаторов C_Ω, а для полярных диэлектриков

$$C_0\approx C_{(\Omega)}-\sum_{\omega_i\geqslant\Omega}C_i. \qquad (4\text{-}9)$$

Для конденсаторных диэлектриков, обладающих высокой добротностью, относительное изменение емкости при росте частоты имеет порядок $\operatorname{tg}\delta$, т. е. достаточно мало. Следовательно, ошибки измерения емкости могут оказаться соизмеримыми и даже большими, чем это изменение, в силу чего для определения параметров схемы замещения нецелесообразно использование зависимости $C(\omega)$ или $\varepsilon(\omega)$.

Иначе дело обстоит с частотной характеристикой $\operatorname{tg}\delta$. Эта величина существенно определяется параметрами схемы замещения R_iC_i, особенно вблизи частот

$\omega_i = 1/\tau_i = 1/R_iC_i$. Так что для таких диэлектриков, у которых $\operatorname{tg}\delta \ll 1$, наиболее информативной является зависимость $\operatorname{tg}\delta(\omega)$.

Рассмотрим вначале случай постоянного $\operatorname{tg}\delta = A = \text{const}$ [4-3, 4-4], тогда, не учитывая сопротивление утечки R_0, для частотной зависимости $\operatorname{tg}\delta$ схемы замещения имеем сумму слагаемых, представляющих собой симметричные относительно $\omega_i = 1/\tau_i = 1/R_iC_i$ функции от логарифма частоты:

$$\operatorname{tg}\delta_{\text{с.з}} = \sum_{i=1}^{m} \frac{C_i/C_0}{\exp\left(\ln\frac{\omega}{\omega_i}\right) + \exp\left(-\ln\frac{\omega}{\omega_i}\right)}. \qquad (4\text{-}10)$$

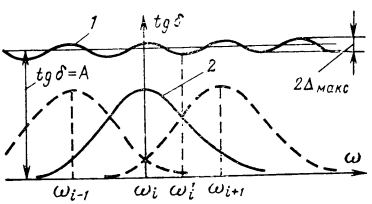


Рис. 4-3. Аппроксимация постоянного тангенса угла потерь (*1*) и результаты действия одного релаксатора (*2*).

На рис. 4-3 показан вклад одного i-го слагаемого, максимальное значение его равно $C_i/2C_0$ на частоте $\omega = \omega_i$. Эта кривая представляет собой зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от частоты для схемы замещения, содержащей емкость C_0 и только один релаксатор:

$$\operatorname{tg}\delta_i = \frac{C_i/C_0}{\omega/\omega_i + \omega_i/\omega}. \qquad (4\text{-}11)$$

При линейном масштабе частоты эта зависимость линейна при $\omega \ll \omega_i$, имеет экстремум при $\omega = \omega_i$ и подчиняется гиперболическому закону при $\omega \gg \omega_i$.

Зависимость (4-11) при $C_i/C_0 = 1$ или $\operatorname{tg}\delta_i/(C_i/C_0)$

$$\varphi_i(\omega) = \frac{1}{\omega/\omega_i + \omega_i/\omega} \qquad (4\text{-}12)$$

назовем нормализованной кривой $\operatorname{tg}\delta$ одного релаксатора, через нее можно выразить частотную зависимость $\operatorname{tg}\delta$ схемы замещения с числом релаксаторов m

$$\operatorname{tg}\delta_{\text{с.з}} = \sum_{i=1}^{m} C_i/C_0\varphi_i(\omega). \qquad (4\text{-}13)$$

Из соображений симметрии $\varphi_i(\omega)$ относительно ω_i следует, что для наиболее точного представления $\operatorname{tg}\delta = A$ с помощью суммы (4-13) значения C_i/C_0 должны быть равными, а частоты ω_i следует располагать логарифмически равномерно (рис. 4-3), т. е.

$$\omega_{i+1}/\omega_i = \alpha^2; \qquad \ln(\omega_{i+1}/\omega_i) = 2\ln\alpha = \text{const}. \tag{4-14}$$

Тогда погрешность аппроксимации

$$\Delta = \operatorname{tg}\delta_{\text{с.з}} - \operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\delta_{\text{с.з}} - A \tag{4-15}$$

будет осциллирующей функцией логарифма частоты, и ее экстремальные значения имеют место на частотах ω_i, а также в промежутках между ними

$$\omega'_i = \sqrt{\omega_i \omega_{i+1}} = \alpha\omega_i, \quad i = 1, 2 \ldots \tag{4-16}$$

При этом максимальная относительная ошибка

$$\Delta_m/A = (S_2 - S_1)/(S_2 + S_1), \tag{4-17}$$

где

$$S_2 = \sum_{i=0,\ \pm1\ \ldots} \frac{1}{\alpha^{2i} + \alpha^{-2i}} = \frac{C_0}{C_i} \operatorname{tg}\delta_{\text{с.з}}(\omega_i); \tag{4-18}$$

$$S_1 = \sum_{i=\pm1,\ \pm3\ldots} \frac{1}{\alpha^{i} + \alpha^{-i}} = \frac{C_0}{C_i} \operatorname{tg}\delta_{\text{с.з}}(\omega'_i), \tag{4-19}$$

а значение C_i/C_0 равно:

$$C_i/C_0 = 2A/(S_2 + S_1). \tag{4-20}$$

Значения S_1 и S_2 могут быть непосредственно вычислены при различных значениях α.

На рис. 4-4 представлены зависимости $\frac{\Delta_m}{A}(\alpha^2)$ и $\frac{C_i}{AC_0}(\alpha^2)$, на основании которых можно выбрать, задавшись максимальной относительной ошибкой Δ_m/A, параметр α^2, определяющий частотную «плотность» релаксаторов и C_i/C_0. Для последней удобно использовать аппроксимацию [4-3, 4-4]

$$C_i/C_0 = 2{,}9A \lg\alpha. \tag{4-21}$$

Теперь, если частотный диапазон, в котором необходима близость $\operatorname{tg}\delta_{с.з}(\omega)$ экспериментальной зависимости $\operatorname{tg}\delta_{э}(\omega)$ ограничен частотами ω_{min} и ω_{max}, можно определить число релаксаторов

$$m = E\left\{\frac{\lg(\omega_{max}/\omega_{min})}{2\lg\alpha}\right\} + 1, \qquad (4\text{-}22)$$

здесь $E(x)$ — символ выделения целой части x; частоты ω_i расположить логарифмически равномерно в этом диапазоне, тем самым определив значения τ_i.

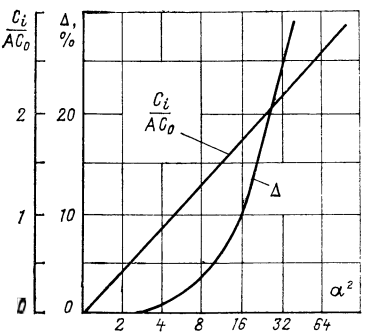


Рис. 4-4. Зависимость относительной максимальной ошибки и параметра C_i/AC_0 от плотности релаксаторов α^2 при $\operatorname{tg}\delta=\text{const}$.

Пример. Допустим, требуется приближенно определить параметры схем замещения конденсаторного диэлектрика с $C_0=1{,}0$ мкФ, $\operatorname{tg}\delta=A=10^{-4}$ в диапазоне частот $\omega_{min}=10^2$ с$^{-1}$, $\omega_{max}=10^6$ с$^{-1}$.

Задавшись максимальной относительной погрешностью 5%, найдем по графику рис. 4-4 $\alpha^2(\Delta/A=0{,}05)\approx 9$, $\alpha=3$, при этом $C_i/AC_0=1{,}4$. Тогда число релаксаторов

$$m = E\left\{\frac{6-2}{0{,}95}\right\} + 1 = 5,$$

$C_i=1{,}4\cdot 10^{-4}$ мкФ. Считая $\alpha^2\approx 10$, имеем: $\omega_1=10^2$, $\omega_2=\alpha^2$, $\omega_1\approx 10^3$, $\omega_3\approx 10^4$, $\omega_4\approx 10^5$, $\omega_5\approx 10^6$. Так что $R_1=1/\omega_1 C_1=0{,}7\cdot 10^8$ Ом, $R_2=0{,}7\cdot 10^7$ Ом, $R_3=0{,}7\cdot 10^6$ Ом, $R_4=0{,}7\cdot 10^5$ Ом, $R_5=0{,}7\cdot 10^4$ Ом.

При ограниченном числе релаксаторов m, а также в случае непостоянства $\operatorname{tg}\delta$ конденсаторного диэлектрика при изменении частоты значения C_i/C_0 и τ_i, определенные по вышеописанной методике, не обеспечивают минимума ошибки аппроксимации свойств диэлектрика схемой замещения [4-3, 4-4, 4-6]. Эти параметры могут быть уточнены путем поиска минимума

некоторого функционала, определяющего меру расхождения $\operatorname{tg}\delta_{с.э}$ и $\operatorname{tg}\delta_э$, например:

$$I=\lambda\sum_{i=1}^{N} w_i(\operatorname{tg}\delta_{iэ}-\operatorname{tg}\delta_{ic.э})^2+(1-\lambda)\max(\operatorname{tg}\delta_{iэ}-\operatorname{tg}\delta_{ic.э})\sqrt{w_i}, \tag{4-23}$$

где λ — коэффициент, определяющий веса среднеквадратичной и минимаксной меры; w_i — вес ошибок аппроксимации на частотах ω_i.

Результаты, полученные на базе описанного выше подхода при $\operatorname{tg}\delta=\text{const}$, являются хорошим начальным приближением для процедуры поиска.

Интересно отметить, что для рассмотренного случая постоянного угла потерь при одинаковых C_i/C_0 и логарифмически равномерном распределении $\omega_i=1/\tau_i$ релаксаторов входная емкость схемы замещения диэлектрика уменьшается с ростом логарифма частоты со скоростью $C_0\cdot 1{,}45\operatorname{tg}\delta$, т. е. в диапазоне ω_{min}—ω_{max} можно считать, что

$$\left.\begin{aligned} C(\omega)&=C_0\left(1-1{,}45\operatorname{tg}\delta\lg\frac{\omega}{\omega_{max}}\right);\\ \frac{1}{C_0}[C(\omega_{min})-C(\omega_{max})]&=1{,}45\operatorname{tg}\delta\lg\frac{\omega_{max}}{\omega_{min}}. \end{aligned}\right\} \tag{4-24}$$

Эти выражения еще раз доказывают, что изменение емкости пропорционально $\operatorname{tg}\delta$.

При фиксированных $\tau_i=1/\omega_i$ функции $\varphi_i(\omega)$ в (4-13) определены и неизвестные параметры C_i/C_0 входят в (4-13) линейно, так что при использовании квадратичной меры близости для оценки этих параметров можно использовать хорошо разработанный в настоящее время метод наименьших квадратов [4-8]. При этом значения C_i/C_0 получаются в результате решения системы нормальных уравнений. Далее, используя эти решения, на каждом шаге можно организовать поиск только по параметрам τ_i таким образом, чтобы минимизировать остаточную сумму квадратов

$$I=\sum_{i=1}^{N} w_i(\operatorname{tg}\delta_{iэ}-\operatorname{tg}\delta_{ic.э})^2. \tag{4-25}$$

Такая последовательность вычислений сокращает общий объем, поскольку поиск ведется только по m параметрам (вместо $2m$). В качестве начального приближения для ω_i берутся логарифмически равномерно распределенные в диапазоне (ω_{min}—ω_{max}) значения. Можно показать, что при непостоянном $\operatorname{tg}\delta(\omega)$, например возрастающем, убывающем или осциллирующем с неслишком большой первой производной, ошибка аппроксимации будет меньше, чем в случае $\operatorname{tg}\delta$=const, при одном и том же числе релаксаторов. Это легко объяснить, исходя из характера нормализованной функции $\operatorname{tg}\delta$ одного релаксатора (рис. 4-3).

Рассмотренная выше схема замещения диэлектрика пригодна для случаев, когда $\operatorname{tg}\delta$ растет с частотой не быстрее, чем линейно. Это связано с допущением, что резонансные частоты различных видов поляризации лежат выше максимальной частоты рассматриваемого диапазона и в схеме замещения индуктивностями, соответствующими инерционности поляризуемых частиц, мы пренебрегали. При наличии более быстрого, чем линейный, роста $\operatorname{tg}\delta$ схема замещения должна быть усложнена введением в нее индуктивных элементов. Однако расчеты, выполненные для большинства твердых конденсаторных диэлектриков, показывают возможность применения упрощенной схемы замешения, при этом ошибка аппроксимации частотной зависимости $\operatorname{tg}\delta$ не превышает 10% и может быть уменьшена увеличением числа релаксаторов. При допустимой для практических целей точности 5—10% оказывается достаточным одного релаксатора на декаду диапазона частоты.

В случае полярных жидких диэлектриков, например совола (пентахлордифенила), из-за быстрого нарастания $\operatorname{tg}\delta$ формальный расчет параметров схемы замещения может приводить к получению отрицательных значений C_i и R_i. Эти релаксаторы не могут быть физически интерпретированы, однако их присутствие в схеме замещения и учет при расчете входного сопротивления или мощности потерь не приводят к ошибкам, поскольку частотные характеристики диэлектрика и схемы замещения совпадают.

В этих же случаях, когда наблюдается значительная зависимость емкости от частоты, следует для $\operatorname{tg}\delta_{с.з}$ использовать точные формулы (4-9) и подбор параметров схемы замещения осуществлять одновременно по $\operatorname{tg}\delta_э$

и $C_э(\omega)$, минимизируя сумму:

$$I = \sum_{i=1} w_i (\operatorname{tg}\delta_{iэ} - \operatorname{tg}\delta_{ic,э})^2 + \sum_{i=1}^{N} p_i [C_э(\omega_i) - C_{с.э}(\omega_i)]^2,$$

где w_i — вес, обратно пропорциональный дисперсии ошибки измерения $\operatorname{tg}\delta_э$; p_i — вес, соответствующий ошибке измерения $C_э(\omega)$.

Если для построения схемы замещения используется частотная зависимость входной емкости $C(\omega)$, для приближенного определения параметров схемы замещения можно применить следующий прием: зависимость емкости от логарифма частоты аппроксимируется убывающей кусочно-постоянной функцией, тогда $\omega_i = 1/\tau_i$ соответствуют местам скачков емкости, а C_i — скачку ΔC [П-4, 4-9].

В случаях, когда требуется изучение поведения диэлектрика на низких частотах, эксперимент сопряжен со значительными трудностями как при генерировании напряжения инфранизких частот, так и при проведении измерений. В таких случаях целесообразно для определения параметров схемы замещения использовать кривую спада тока $i(t)$, получающуюся при включении образцов конденсаторов на постоянное напряжение. Другими словами, вместо частотных характеристик удобнее использовать временные.

Если к конденсаторному диэлектрику приложить скачкообразное напряжение, то в соответствии с (2-13) ток будет равен сумме дельта-функции, относящейся к току емкости C_0, единичного тока, протекающего через сопротивление утечки изоляции, и ряда экспонент, соответствующим различным видам поляризации

$$i(t) = \frac{1}{C_0}\delta(t) + \frac{1}{R_0} + \sum_{j=1}^{m} \frac{1}{R_j} e^{-t/\tau_j}. \qquad (4\text{-}26)$$

В диапазоне средних и высоких частот $\omega_1 \leqslant \omega \leqslant \omega_{max}$ параметры схемы замещения диэлектрика определяются по частотной характеристике $\operatorname{tg}\delta(\omega)$, как было описано выше. Далее в соответствии с допустимой ошибкой аппроксимации выбирают логарифмически равномерно распределенные значения τ_j, $j=1, 2, \ldots, m_1$, принимая $\tau_1 = \tau'_1$, т. е. максимальной постоянной времени, определенной по частотной характеристике $\operatorname{tg}\delta(\omega)$, а

$$\tau_j = \tau_{j-1}\alpha^2.$$

Тогда для схемы замещения на рис. 4-2 по прошествии времени $t_0 \approx \tau_1$ процессы заряда C_0 и C_j «высокочастотных» релаксаторов закончатся, и в выражении для тока останутся интересующие нас параметры и уже известные τ_1 и R_1

$$i(t > t_0) = \frac{1}{R_0} + \sum_{j=1}^{m_1} \frac{1}{R_j} e^{-t/\tau_j}. \qquad (4\text{-}27)$$

Выбирая значения тока в моменты времени $t_j=\tau_j$, $j=1, 2, \ldots, m$ на кривой спада, получаем систему уравнений

$$i(t_j)=\frac{1}{R_0}+\sum_{\nu=1}^{m_1}\frac{1}{R_\nu}e^{-t_j/\tau_\nu},\quad j=1, 2, \ldots, m, \qquad (4\text{-}28)$$

из которой находятся параметры R_j.

Параметр схемы замещения R_0 определяется значением тока при $t\longrightarrow\infty$.

В табл. 4-1 приведены параметры схем замещения некоторых конденсаторных диэлектриков, обеспечивающих совпадение частотных характеристик $\operatorname{tg}\delta(\omega)$ ди-

Таблица 4-1

Параметр	Диэлектрик					
	Бумага, пропитанная ТХД	Бумага, пропитанная маслом	Пленка поликарбонатная	Пленка полипропиленовая	Пленка полистирольная	Пленка ПТФЭ (Фторопласт-4)
C_{1*}	$8\cdot10^{-3}$	$1{,}1\cdot10^{-1}$	$2\cdot10^{-3}$	$8{,}9\cdot10^{-4}$	$8{,}6\cdot10^{-4}$	$5{,}9\cdot10^{-4}$
τ_1, с	$1{,}3\cdot10^{-2}$	21,7	$1{,}7\cdot10^{-2}$	$1{,}1\cdot10^{-2}$	$1{,}2\cdot10^{-2}$	$1{,}1\cdot10^{-2}$
C_{2*}	$6{,}7\cdot10^{-3}$	$2{,}3\cdot10^{-2}$	10^{-3}	$7{,}4\cdot10^{-4}$	$5{,}1\cdot10^{-4}$	$4{,}9\cdot10^{-4}$
τ_2, с	$1{,}1\cdot10^{-3}$	1,7	$1{,}2\cdot10^{-3}$	$1{,}1\cdot10^{-3}$	$1{,}1\cdot10^{-3}$	$1{,}1\cdot10^{-3}$
C_{3*}	$6{,}9\cdot10^{-3}$	$1{,}1\cdot10^{-2}$	$1{,}8\cdot10^{-3}$	$7{,}1\cdot10^{-4}$	$4{,}3\cdot10^{-4}$	$4{,}1\cdot10^{-4}$
τ_3, с	$1\cdot10^{-4}$	$1{,}4\cdot10^{-1}$	$1{,}2\cdot10^{-4}$	$9{,}9\cdot10^{-5}$	$1{,}3\cdot10^{-4}$	$1{,}0\cdot10^{-4}$
C_{4*}	$6{,}3\cdot10^{-3}$	$6{,}8\cdot10^{-3}$	$3{,}2\cdot10^{-3}$	$7{,}1\cdot10^{-4}$	$3{,}7\cdot10^{-4}$	$3{,}5\cdot10^{-4}$
τ_4, с	$1{,}4\cdot10^{-5}$	$1{,}2\cdot10^{-2}$	$1{,}4\cdot10^{-5}$	$1{,}1\cdot10^{-5}$	$1{,}4\cdot10^{-5}$	$1{,}1\cdot10^{-5}$
C_{5*}	$2{,}4\cdot10^{-2}$	$6{,}4\cdot10^{-3}$	$5{,}4\cdot10^{-3}$	$7{,}5\cdot10^{-4}$	$3{,}3\cdot10^{-4}$	$3{,}2\cdot10^{-4}$
τ_5 с,	$1{,}3\cdot10^{-6}$	$1{,}1\cdot10^{-3}$	$1{,}5\cdot10^{-6}$	$1{,}1\cdot10^{-6}$	$1{,}5\cdot10^{-6}$	$1{,}1\cdot10^{-6}$
C_{6*}	$7{,}4\cdot10^{-2}$	$6{,}6\cdot10^{-3}$	$8\cdot10^{-3}$	$7{,}7\cdot10^{-4}$	$3{,}0\cdot10^{-4}$	$2{,}9\cdot10^{-4}$
τ_6, с	$1{,}8\cdot10^{-7}$	$1{,}1\cdot10^{-4}$	$1{,}7\cdot10^{-7}$	$1{,}0\cdot10^{-7}$	$1{,}7\cdot10^{-7}$	$1{,}0\cdot10^{-7}$
C_{7*}	—	$6\cdot10^{-3}$	$1{,}3\cdot10^{-2}$	$9{,}3\cdot10^{-4}$	$2{,}8\cdot10^{-4}$	$2{,}9\cdot10^{-4}$
τ_7, с	—	$1{,}4\cdot10^{-5}$	$1{,}9\cdot10^{-8}$	$0{,}8\cdot10^{-8}$	$2{,}1\cdot10^{-8}$	$1{,}1\cdot10^{-8}$
C_{8*}	—	$2{,}1\cdot10^{-2}$	$2{,}6\cdot10^{-2}$	—	$3{,}5\cdot10^{-4}$	$3{,}6\cdot10^{-4}$
τ_8, с	—	$1{,}3\cdot10^{-6}$	$1{,}9\cdot10^{-9}$	—	$2{,}7\cdot10^{-9}$	$1{,}2\cdot10^{-9}$
C_{9*}	—	$5{,}7\cdot10^{-2}$	—	—	—	$5\cdot10^{-4}$
τ_9, с	—	$1{,}7\cdot10^{-7}$	—	—	—	$1{,}2\cdot10^{-10}$
C_{10*}	—	$7{,}1\cdot10^{-2}$	—	—	—	—
τ_{10}, с	—	$1{,}7\cdot10^{-8}$	—	—	—	—
Частота, Гц:						
f_{min}	10	10^{-2}	10	10	10	10
f_{max}	10^6	10^7	10^8	10^7	10^8	10^7
Δ, %	8,9	8,7	7,9	6,8	6,6	7,4

Примечание. $C_{i*}=C_i/C_0$.

электрика [1] и его схемы замещения с погрешностью не более 10%.

Поскольку параметры схемы замещения диэлектрика определяются по частотной характеристике $\operatorname{tg}\delta(\omega)$, которая зависит от температуры, эти параметры получаются различными при разных температурах. Для расчетов чаще всего используются параметры, полученные при рабочей температуре диэлектрика. В табл. 4-2 приведены параметры схемы замещения полиэтилентерефталатной пленки при различных температурах, описывающие свойства диэлектрика с погрешностью не более 10% в диапазоне частот от 10 до 10^7 Гц.

Таблица 4-2

Параметр	Температура, °С				
	—60	25	75	125	150
C_{1*}	$1{,}6\cdot10^{-2}$	$3{,}7\cdot10^{-3}$	$8{,}8\cdot10^{-4}$	$1{,}9\cdot10^{-2}$	$1{,}1\cdot10^{-}$
τ_1, с	$1{,}1\cdot10^{-2}$	$1{,}2\cdot10^{-2}$	10^{-2}	$9{,}8\cdot10^{-3}$	$1{,}1\cdot10^{-2}$
C_{2*}	$1{,}4\cdot10^{-2}$	$3{,}5\cdot10^{-3}$	$1{,}3\cdot10^{-3}$	$1{,}6\cdot10^{-2}$	$9{,}1\cdot10^{-3}$
τ_2, с	$7{,}9\cdot10^{-4}$	$8{,}1\cdot10^{-4}$	$5{,}4\cdot10^{-4}$	$8{,}3\cdot10^{-4}$	$7{,}3\cdot10^{-4}$
C_{3*}	$1{,}3\cdot10^{-2}$	$8{,}2\cdot10^{-3}$	$3{,}7\cdot10^{-3}$	$1{,}7\cdot10^{-2}$	$1{,}5\cdot10^{-2}$
τ_3, с	$6{,}2\cdot10^{-5}$	$5{,}1\cdot10^{-5}$	$5{,}5\cdot10^{-5}$	$8{,}7\cdot10^{-5}$	$5{,}8\cdot10^{-5}$
C_{4*}	$1{,}2\cdot10^{-2}$	$1{,}6\cdot10^{-2}$	$8{,}6\cdot10^{-3}$	$1{,}9\cdot10^{-2}$	$2{,}7\cdot10^{-2}$
τ_4, с	$4{,}8\cdot10^{-6}$	$4{,}8\cdot10^{-6}$	$4{,}3\cdot10^{-6}$	$4{,}8\cdot10^{-6}$	$5{,}2\cdot10^{-6}$
C_{5*}	$1{,}1\cdot10^{-2}$	$2{,}1\cdot10^{-2}$	$1{,}3\cdot10^{-2}$	$1{,}6\cdot10^{-2}$	$3\cdot10^{-2}$
τ_5, с	$3{,}6\cdot10^{-7}$	$3{,}9\cdot10^{-7}$	$3{,}6\cdot10^{-7}$	$3{,}6\cdot10^{-7}$	$4\cdot10^{-7}$
C_{6*}	$8{,}9\cdot10^{-3}$	$2{,}6\cdot10^{-2}$	$1{,}9\cdot10^{-2}$	$2{,}1\cdot10^{-2}$	$3{,}3\cdot10^{-2}$
τ_6, с	$2{,}5\cdot10^{-8}$	$2{,}7\cdot10^{-8}$	$2{,}5\cdot10^{-8}$	$2{,}8\cdot10^{-8}$	$2{,}8\cdot10^{-8}$

Для снятия частотных характеристик и построения схем замещения на основе исследований, проведенных в настоящем параграфе, можно рекомендовать при проведении эксперимента логарифмически равномерное распределение частот с плотностью три-пять точек на декаду частоты [4-7].

Параметры и схема замещения токоведущих частей конденсатора

Основные элементы схемы замещения, соответствующие металлическим частям конструкции конденсатора, были подробно рассмотрены для синусоидального напряжения в § 3-1.

[1] Измерялась зависимость $\operatorname{tg}\delta(\omega)$ образцов конденсаторов малой емкости, чтобы можно было не учитывать потери в металлических частях и их индуктивности.

Поскольку процессы в токоведущих частях связаны с током конденсатора, соответствующие им элементы схемы замещения должны также проводить ток конденсатора, т. е. должны быть включены последовательно. Заметим, что для диэлектрика определяющим было напряжение, в связи с чем его элементы схемы замещения образовывали параллельные ветви.

Существенной особенностью схемы замещения металлических частей конструкций конденсатора является то, что вследствие перераспределения тока в них, обуслов-

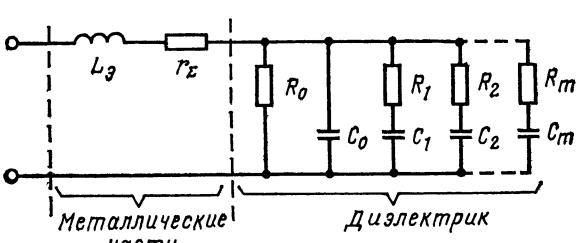


Рис. 4-5. Схема замещения конденсатора в широком диапазоне частот.

ленного электрическим и магнитным поверхностным эффектом [3-6], а также эффектом близости, эти параметры зависят от частоты, что необходимо учитывать при несинусоидальности напряжения, воздействующего на конденсатор.

Более того, $r_Σ(\omega)$ и $L_э(\omega)$ представляют собой иррациональные функции частоты ($\sqrt{\omega}$), что определяет преимущественное использование частотно-зависимых параметров схемы замещения, хотя всегда бывает предпочтительным использование схем замещения с постоянными параметрами.

В практических расчетах индуктивность $L_э$ может быть принята постоянной (см. § 3-1).

Активное сопротивление $r_Σ(\omega)$ при несинусоидальном токе в задачах расчета потерь может быть заменено сопротивлением $r_Σ$, не зависящим от частоты, значение сопротивления определяется характером частотной зависимости $r_Σ(\omega)$ и частотным спектром тока.

Очевидно, что в этом случае мощность потерь в металлических частях

$$P_{\text{м}}=\sum_{k=1}^{\infty} I^2_k r_{\Sigma}(\omega_k)=r_{\Sigma}\sum_{k=1}^{\infty} I^2_k=r_{\Sigma}I^2, \qquad (4\text{-}29)$$

откуда можно найти r_{Σ}.

Расчеты, выполненные при $r_{\Sigma}(\omega)=r_0+a\sqrt{\omega}$ для наиболее распространенных спектров тока конденсатора в схемах ТП, показали, что удовлетворительные для практики результаты получаются при выборе

$$r_{\Sigma}=r_{\Sigma}(\omega_m/2), \qquad (4\text{-}30)$$

где ω_m — частота, до которой спектр мощности гармоник тока составляет примерно 90%.

При импульсном характере тока, например в коммутирующих конденсаторах, $\omega_m \approx \pi/t_{\phi}$.

Итак, на основе вышеизложенного схема замещения конденсатора в широком диапазоне частот (рис. 4-5) содержит последовательные элементы $r_{\text{э}}(\omega)$ и $L_{\text{э}}$, соответствующие металлическим частям конструкции, и параллельные элементы C_0, R_0, R_i, C_i, $i=1, 2, \ldots, m$, соответствующие диэлектрику.

4-2. МОЩНОСТЬ ПОТЕРЬ В ДИЭЛЕКТРИКЕ КОНДЕНСАТОРА ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ

Потребность создания устройств с минимальными габаритами, массой и стоимостью приводит к необходимости эксплуатации конденсаторов вблизи предельно допустимых режимов, одной из важнейших характеристик которых является мощность тепловыделения. Обеспечение долговечной и надежной работы конденсаторов в этих режимах требует достаточно точного вычисления тепловыделения.

Кроме того, расчет потерь энергии при непериодическом режиме или средней мощности потерь в периодических режимах необходим для оценки к. п. д. ТП.

Как и в случае синусоидального напряжения, потери энергии в конденсаторе при напряжении несинусоидальной формы подразделяются на три группы: потери в основном диэлектрике, потери в металлических частях

конструкции конденсатора и добавочные потери (см. § 2-3).

Однако при несинусоидальном напряжении на конденсатор воздействует спектр частот, часто довольно широкий, что приводит к увеличению мощности потерь по сравнению с синусоидальным напряжением [1-16], а также к перераспределению потерь между частями конструкции конденсатора. Так, при синусоидальном напряжении потери в металлических частях обычно составляют от 1 до 40% суммарных потерь[1]. При несинусоидальном напряжении их доля при той же частоте повторения может возрасти до 90% и более. Одновременно возрастают все составляющие потерь: в металлических частях конструкции конденсатора вследствие возрастания действующего значения тока, а также в изоляции конденсатора из-за воздействия спектра гармоник напряжения.

Если для оценки к. п. д. ТП достаточно рассчитать суммарные потери, то температурный режим конденсатора, определяющий его надежность, существенно зависит от распределения этих потерь по элементам конструкции, поэтому необходима раздельная оценка всех составляющих потерь: в диэлектрике, обкладках, в выводах, контактном узле, крышке и т. д.

Потери в диэлектрике, как рассмотрено в § 3-2, обусловлены релаксационными процессами поляризации и токами утечки.

Если $R_{ут}$ — сопротивление утечки изоляции, то $P_{ут}=U^2/R_{ут}$, где U — действующее значение несинусоидального напряжения. Обычно значение $R_{ут}$ достаточно велико ($R_{ут}C=10^9 \div 10^{11}$ Ом·мкФ) и $P_{ут}$ вносит незначительный вклад в суммарные потери по сравнению с другими составляющими. Однако при повышенной температуре (100—120°С) сопротивление $R_{ут}$ бумажного диэлектрика снижается до значений порядка десятков килоом при емкости в 1,0 мкФ, что может потребовать учета вклада токов утечки в общие потери в диэлектрике.

Релаксационные потери в диэлектрике составляют значительную часть в суммарных потерях, их определению и посвящен в основном настоящий параграф. Следует отметить, что эти потери связаны с выделением

[1] Меньшее значение характерно для конденсаторов низкой частоты, малой емкости, большее — для конденсаторов средней частоты.

теплоты в объеме активного конденсаторного диэлектрика. Потери существенно зависят от частоты, температуры и формы воздействующего напряжения. Практически для всех диэлектриков эти потери возрастают с ростом температуры и частоты.

Потери в токоведущих частях в отличие от потерь в диэлектрике более локализованы: это джоулева теплота, выделяющаяся в обкладках, выводах, контактном узле внутренних соединительных проводниках и металлических частях корпуса конденсатора, главным образом, в его крышке. В последнем случае потери энергии вызываются вихревыми токами, возникающими в корпусе под воздействием переменного магнитного поля тока конденсатора. Потери энергии в проводящих частях также возрастают с частотой и температурой, причем быстрее, чем при синусоидальном напряжении, поскольку при несинусоидальном напряжении сильнее проявляют себя поверхностный эффект, эффект близости и процесс передачи энергии через магнитное поле в окружающие металлические детали. Особенно заметно возрастают потери в металлических частях конструкции конденсаторов, работающих в импульсных режимах с короткими длительностями фронтов при повышенных частотах повторения (коммутирующие и демпфирующие конденсаторы).

Добавочные потери складываются из потерь в корпусной изоляции, на ионизацию, механических потерь, связанных с действием электрического поля на обкладки конденсатора, и др. Добавочные потери и при несинусоидальном напряжении имеют обычно сравнительно небольшое значение (до 1—3%) и трудно поддаются расчету. Как правило, в расчетах эти потери не учитываются.

Методы расчета потерь в конденсаторах

Большой практический интерес к задаче нахождения расчетным путем потерь энергии в конденсаторах породил большое многообразие как приближенных, так и более или менее точных методов.

В соответствии с двумя способами описания сигналов (в частотной и временной области) эти методы можно разделить на две основные группы [П-4, 4-10, 4-11].

К первой группе относятся методы, базирующиеся на представлении воздействующего напряжения или тока

в виде суммы синусоидальных составляющих разных частот [П-1, 4-11—4-20]. При этом используют обычно простейшие схемы замещения конденсатора с постоянными или частотно-зависимыми параметрами.

Вторую группу составляют методы, основывающиеся на вычислении мгновенных значений токов в активных [П-4, 4-3, 4-4, 4-21—4-24] сопротивлениях схемы замещения.

Частотные методы. Частотные методы расчета потерь основываются на принципе суперпозиции и используют гармонический анализ токов и напряжений. В них мощность потерь определяется как сумма потерь от каждой гармоники воздействующего тока или напряжения.

Так, для последовательной схемы замещения

$$P=\sum_{k=1}^{\infty} P_k=\sum_{k=1}^{\infty} I^2_k\left[r_\Sigma(\omega_k)+r_s(\omega_k)\right]=\sum_{k=1}^{\infty} I^2_k r_\text{э}(\omega_k), \quad (4\text{-}31)$$

для параллельной

$$P=\sum_{k=1}^{\infty} P_k=\sum_{k=1}^{\infty}\frac{U^2_k}{R_\text{э}(\omega_k)}. \quad (4\text{-}32)$$

Учитывая соотношения эквивалентности между параметрами схем замещения и выражение для $\operatorname{tg}\delta$ (см. § 3-1), получаем:

при параллельной схеме замещения

$$P=\sum_{k=1}^{\infty} U^2_k k\Omega C_p\,(k\Omega)\operatorname{tg}\delta\,(k\Omega); \quad (4\text{-}33)$$

при последовательной

$$P=\sum_{k=1}^{\infty}\frac{I^2_k\operatorname{tg}\delta\,(k\Omega)}{k\Omega C_s\,(k\Omega)}. \quad (4\text{-}34)$$

Использование (4-33) или (4-34) зависит от того, что проще разлагается в ряд Фурье: ток или напряжение.

В практических расчетах по (4-33) или (4-34) приходится ограничиваться конечным числом членов ряда k_{max}, зависящим от спектра напряжения или тока, и частотной зависимостью $\operatorname{tg}\delta(\omega)$ [4-11]. Это число может колебаться в широких пределах: от единиц до нескольких сотен, оно возрастает при увеличении максимальной производной кривой напряжения по времени и становится максимальным при воздействии на конденсатор напряжений таких форм, у которых $du/dt\longrightarrow\infty$ (например, идеальной прямоугольной формы).

В общем случае при произвольном изменении параметров схемы замещения с частотой и любой форме напряжения необходимо применять (4-33), причем для раздельного определения потерь

U_k, $\operatorname{tg}\delta(\omega)$ и $C(\omega)$ следует брать только для диэлектрика, а потери в металлических частях определять, используя $r_\Sigma(\omega)$:

$$P_м = \sum_{k=1}^{\infty} I^2_k r_\Sigma(\omega_k). \qquad (4\text{-}35)$$

Частотные спектры тока конденсатора и напряжения на его диэлектрике легко определить по частотному спектру воздействующего на конденсатор напряжения $U(\omega)$, используя схемы замещения (рис. 3-9 или 4-5) и известные методы расчета цепей переменного тока [3-1].

Рассчитав спектр напряжения, воздействующего на диэлектрик конденсатора, который в общем случае отличается от спектра напряжения, подведенного к конденсатору, по (4-33) находят потери в диэлектрике. Для точного определения спектров токов и напряжений необходимо предварительно выполнить расчет электромагнитных процессов в цепях ТП, содержащих конденсатор.

Для определения составляющих потерь в металлических частях в (4-35) вместо $r_\Sigma(\omega)$ следует подставить соответствующие значения сопротивлений (r_0, $r_к$, $r_в(\omega)$, $r_{кр}(\omega)$ (см. § 3-1).

Для частных случаев типовых форм напряжения расчет мощности потерь, базирующийся на частотном методе, изложен в § 4-4.

Из достоинств частотных методов можно отметить их универсальность и высокую точность при достаточном числе членов ряда (4-33). Однако применение этих методов сопряжено с громоздкими вычислениями спектров гармоник и суммы (4-33). Применение ЭВМ в расчетах позволяет в некоторой степени преодолеть трудности, связанные с громоздкостью вычислений.

Расчет потерь в диэлектрике при представлении воздействующего напряжения во временно́й области. Наличие эквивалентных схем замещения конденсаторного диэлектрика, состоящих из частотно-независимых элементов, дает принципиальную возможность расчета потерь без использования гармонического анализа.

Для определения потерь энергии в диэлектрике достаточно найти потери энергии W_k в каждом из релаксаторов, т. е. в каждой из RC-цепочек, которые находятся под одним и тем же напряжением $u_д(t)$. Тогда

$$W = \sum_{k=1}^{m} W_k, \qquad (4\text{-}36)$$

причем потери энергии W_k за время Δt составляют:

$$W_k = \int_{t}^{t+\Delta t} i^2_k(t)\, R_k\, dt. \qquad (4\text{-}37)$$

Зная энергию потерь за интервал времени T, можно определить среднюю за это время мощность потерь

$$P = W/T. \qquad (4\text{-}38)$$

Мгновенное значение тока $i_k(t)$ k-го релаксатора и напряжение на его емкости C_k определяются по закону Кирхгофа и диф-

ференциальному уравнению

$$\left.\begin{aligned} i_k R_k + u_{Ck} &= u_д(t); \\ i_k &= C_k \frac{du_{Ck}}{dt} \end{aligned}\right\} \qquad (4\text{-}39)$$

при начальных условиях $u_{Ck}(0)=U^0_{Ck}$

В [П-4, 4-22, 4-28] ток каждого релаксатора находим с помощью его переходной проводимости $h_k(t)=\frac{1}{R}e^{-t/R_kC_k}$. Ток в квазистационарном режиме получаем наложением частных решений, которые в свою очередь определяем с помощью интеграла Дюамеля.

Для ряда форм импульсных напряжений получены аналитические выражения, связывающие мощность потерь с параметрами импульсов напряжения. Подобный подход к вычислению потерь рассмотрен в [4-23].

Определение потерь энергии или средней мощности по (4-36) и (4-38) можно осуществить при произвольной форме воздействующего на диэлектрик напряжения путем численного интегрирования управления (4-39). Один из возможных способов нахождения тока состоит в превращении этого дифференциального уравнения в соответствующее разностное и вычислении по рекуррентным формулам дискретных значений тока i_k и напряжения U_{Ck}. При этом возникает погрешность в определении W_k, если ток i считать постоянным в течение интервала квантования Δt [4-30]. Уменьшить эту погрешность можно путем нахождения мгновенного значения тока для каждого интервала Δt, при этом для упрощения расчетов воздействующее напряжение на этих интервалах следует аппроксимировать простыми функциями, например постоянной или линейной [4-3, 4-4]. Недостатком метода расчета потерь с кусочно-постоянной аппроксимацией воздействующего напряжения является возрастание времени счета при уменьшении интервала квантования при наличии в кривой напряжения участков с высокими значениями du/dt.

Пусть напряжение $u_д(t)$ представляет собой кусочно-постоянную на интервалах Δt_j функцию времени. Выбрав достаточно малые Δt_j, можно представить практически любой закон изменения напряжения во времени. Таким образом,

$$u(t)=u_j=\text{const}, \quad t_j \leqslant t < t_j+\Delta t_j,$$

и считая известным напряжение на конденсаторе k-го релаксатора C_k $u_{Ck}(t_j)=U^0_{Ckj}$, получаем из (4-39) для интервала времени

$$\left.\begin{aligned} & t_j \leqslant t < t_j + \Delta t_j; \\ & u_{Ck}(t) = U^0_{Ckj} e^{-\frac{t-t_j}{R_kC_k}} + u_j\left(1 - e^{-\frac{t-t_j}{R_kC_k}}\right); \\ & i_k(t) = \frac{u_j - U^0_{Ckj}}{R_k} e^{-\frac{t-t_j}{R_kC_k}}. \end{aligned}\right\} \qquad (4\text{-}40)$$

Теперь можно вычислить для j-го интервала времени потери энергии в k-м релаксаторе

$$W_{kj} = \int_{t_j}^{t_j+\Delta t} R_k i^2_k(t)\,dt = \frac{C_k(u_j - U^0_{Ckj})^2}{2}\left(1 - e^{-\frac{2\Delta t_j}{R_k C_k}}\right). \quad (4\text{-}41)$$

Напряжение $u_{Ck}(t_j+\Delta t_j)$, определяемое из (4-39) при $t=t_j+\Delta t_j$, является начальным условием для следующего $(j+1)$-го интервала времени, таким образом, получается рекуррентное соотношение для напряжения u_{Ck} в моменты времени t_j

$$U^0_{Ck}(j+1) = u_{Ck}(t_j+\Delta t_j) = U^0_{Ckj} + u_j\left(1 - e^{-\frac{\Delta t_j}{\tau_k}}\right), \quad (4\text{-}42)$$

где $\tau_k = R_k C_k$ — постоянная времени k-й RC-цепи.

Начиная с некоторого значения U^0_{Ck}, которое до подключения конденсатора может быть принято равным нулю, можно последовательно получить значения $u_{Ck}(t_j)$ и вычислить энергию W_{kj} для всех интервалов времени $j=1, 2, \ldots, N$. Суммируя полученные значения энергии для всех релаксаторов и по всем интервалам времени, получаем суммарные потери энергии в диэлектрике

$$W_д(N) = \sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{m} W_{kj}.$$

В случае периодического воздействующего напряжения $u_д(t) = u_д(t+T)$ следует, начиная с произвольного, например нулевого, значения U^0_{Ck1} найти, используя рекуррентное соотношение (4-42), ряд значений $u_{Ck}(T)$, $u_{Ck}(2T)$, и т. д. и после того, как эти величины перестанут практически изменяться, т. е. при

$$|u_{Ck}(nT) - u_{Ck}[(n+1)T]| < \Delta,$$

где Δ — выбранное малое число, можно считать, что получен установившийся режим, при котором и выполняется расчет потерь энергии за период T.

В этом случае суммирование по j осуществляется за период T, и средняя за период мощность потерь в диэлектрике

$$P_д = \frac{1}{T}\sum_{j=1}^{N_T}\sum_{k=1}^{m} W_{kj}. \quad (4\text{-}43)$$

При непериодическом воздействующем на конденсатор напряжении мощность потерь оказывается неодинаковой на разных интервалах времени. В этих случаях, зная зависимость $u_д(t)$ и начальные условия на конденсаторах C_k, можно рассчитать зависимость потерь энергии от времени в моменты t_j или в более редкие моменты. Первая разность энергии $W(t)$, разделенная на интервал времени Δt

$$P_j = \frac{\Delta W_j}{\Delta t_j} = \frac{W(t_{j+1}) - W(t_j)}{t_{j+1} - t_j},$$

представляет собой среднюю мощность потерь для j-го интервала времени.

Этот метод можно использовать и при расчете потерь в нелинейном конденсаторе, когда R_k и C_k являются функциями воздействующего напряжения. Если принять, что $u_д(t)$ на интервале Δt не изменяется, то ему соответствуют определенные значения $R_k(u_д)$ и $C_k(u_д)$, которые изменяются одновременно с $u_д(t)$. Аналогично можно применять этот метод также в случае, если параметры схемы замещения R_k и C_k зависят от u_{Ck}.

Для линейных конденсаторов путем некоторого усложнения расчетных формул можно существенно сократить требуемое число интервалов времени Δt_j, применив кусочно-линейную аппроксимацию напряжения $u_д(t)$ [4-3, 4-4, 4-31].

Рассмотрим одну из RC-цепочек схемы замещения диэлектрика в интервале времени Δt_j, когда напряжение $u_д(t)$ изменяется линейно:

$$u_д(t)=a+bt.$$

Тогда из (4-39) мгновенное напряжение на емкости релаксатора равно:

$$u_C(t)=a+b(t+\tau)+(U^0{}_C+b\tau-a)e^{-t/\tau},$$

где $U^0{}_C$ — значение напряжения u_C в момент времени $t=0$; $\tau=RC$ — постоянная времени.

Мгновенное значение тока

$$i(t)=C\frac{du_C(t)}{dt}=\frac{1}{R}[b\tau(1-e^{-t/\tau})+(a-U^0{}_C)e^{-t/\tau}].$$

Потери энергии за время Δt равны:

$$W=\int_0^{\Delta t} i^2(t)R\,dt=\frac{1}{R}\left\{(b\tau)^2\Delta t+d\tau(1-e^{-\Delta t/\tau})\times\right.$$

$$\left.\times\left[-\frac{d(1+e^{-\Delta t/\tau})}{2}-2b\tau\right]\right\},$$

где $d=U^0{}_C+b\tau-a$.

Если воздействующее на диэлектрик напряжение $u_д(t)$ представлено в виде последовательности прямолинейных участков

$$u_д(t)=a_j+b_j(t-t_j);\quad t_j\leqslant t\leqslant t_j+\Delta t_j;$$

$$j=1,\ 2,\ldots,\ N,$$

легко получить рекуррентные выражения для $u_C(t_j)$ и для W_j, аналогичные (4-41), (4-42):

$$u_{Ck}(j+1)=a_j+b_j(\Delta t_j-\tau_k)+d_{jk}e^{-\Delta t_j/\tau_k}; \qquad (4\text{-}44)$$

$$W_{kj}=\frac{1}{R_k}\left\{(b_j\tau_k)^2\Delta t_j+d_j\tau_k(1-e^{-\Delta t_j/\tau_k})\times\right.$$

$$\left.\times\left[\frac{d_j(1+e^{-\Delta t_j/\tau_k})}{2}-2b_j\tau_k\right]\right\}, \qquad (4\text{-}45)$$

как и ранее

$$d_j=u_{Ck}(t_j)+b_j\tau_k-a_j.$$

Нетрудно заметить, что (4-41), (4-42) для кусочно-постоянной аппроксимации являются частным случаем полученных выше выражений для кусочно-линейной аппроксимации, если в (4-44), (4-45) принять $b_j=0$.

Применение рассмотренных методов расчета потерь дает значительную экономию времени в случае, если проектирование ТП производится с помощью ЭВМ, поскольку в результате расчетов электромагнитных процессов в ТП информация о напряжении на конденсаторе представляется в виде дискретных значений в определенные моменты времени.

Помимо вычислительной простоты описанных выше численных методов, можно отметить высокую степень формализации, возможность расчета потерь в нестационарных режимах и при произвольной как угодно сложной форме воздействующего на диэлектрик напряжения.

Недостатками метода являются: необходимость предварительного получения схемы замещения диэлектрика с постоянными параметрами, ограниченная точность, обусловленная аппроксимацией напряжения и приближенным характером совпадения характеристик конденсаторного диэлектрика и его схемы замещения. Кроме того, получение результата в численном виде затрудняет анализ влияния на потери параметров воздействующего напряжения.

4-3. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТЯХ КОНСТРУКЦИИ КОНДЕНСАТОРА

Расчет потерь в токоведущих частях так же, как и для диэлектрика, базируется на знании схемы замещения конденсатора. Основным элементом схемы, в котором выделяется мощность потерь токоведущих частей, является сопротивление $r_\Sigma(\omega)$, равное сумме составляющих, соответствующих различным элементам конструкции конденсатора: обкладкам, выводам, крышке и контактному узлу конденсатора:

$$r_\Sigma(\omega)=r_о+r_в(\omega)+r_к(\omega)+r_{к.у}(\omega).$$

Как было показано в § 3-1 и 4-1, сопротивление из-за поверхностного эффекта оказывается функцией частоты, которая аппроксимируется выражением (см. табл. 3-2)

$$r_\Sigma(\omega)=r+a\sqrt{\omega}. \qquad (4\text{-}46)$$

Расчет энергии потерь в r_Σ может производиться как при частотном, так и при временном способе описания сигнала.

В первом случае мощность потерь получается как сумма мощностей от каждой гармоники тока конденсатора

$$P_{\text{м}} = \sum_{k=1}^{\infty} I^2_k r_{\Sigma}(\omega_k). \qquad (4\text{-}47)$$

Таким образом, потери в обкладках

$$P_{\text{о}} = \sum_{k=1}^{\infty} I^2_k r_{\text{о}} = r_{\text{о}} \sum_{k=1}^{\infty} I^2_k = r_{\text{о}} I^2$$

определяются сопротивлением $r_{\text{о}}$ и действующим значением тока конденсатора.

Потери в выводах и соединительных проводниках

$$P_{\text{в}} = \sum_{k=1}^{\infty} I^2_k r_{\text{в}}(\omega_k)$$

зависят уже от спектра гармоник тока.

В приближенных расчетах можно считать r_{Σ}, $r_{\text{в}}$ или $r_{\text{к}}$ постоянными, не зависящими от частоты, тогда мощность потерь, как в случае потерь в обкладках, определяется действующим значением тока, независимо от формы.

Аналогично определяются потери в крышке конденсатора и в контактных узлах.

Применяя методы расчета цепей к полной схеме замещения конденсатора (рис. 4-5), можно найти ток и потери в сопротивлении r_{Σ}. Однако без существенного уменьшения точности расчет потерь в r_{Σ} можно выполнять для упрощенных схем замещения конденсатора.

Так, ввиду их малости можно пренебречь токами в R_0 и релаксаторах R_iC_i схемы замещения диэлектрика, т. е. заменить диэлектрик только емкостью C_0. В этом случае переходная проводимость схемы замещения конденсатора значительно упрощается:

$$h(t) = \frac{1}{L_{\text{э}}(p_1 - p_2)}(e^{p_1 t} - e^{p_2 t}), \qquad (4\text{-}48)$$

где p_1, p_2 — корни характеристического уравнения последовательной цепочки r_Σ, $L_э$, C_0,

$$p_{1,2}=-\frac{r_\Sigma}{2L_э}\pm\sqrt{\frac{r^2_\Sigma}{4L^2_э}-\frac{1}{L_эC_0}}, \qquad (4\text{-}49)$$

что облегчает нахождение токов $i(t)$ при использовании формул Дюамеля [3-1].

Напряжение, воздействующее на конденсатор, аппроксимируется обычно отрезками прямых. На интервалах аппроксимации потери энергии

$$W_j=\int_{t_j}^{t_j+\Delta t_j} i^2(t)\,r_\Sigma\,dt. \qquad (4\text{-}50)$$

Суммарные потери энергии и средняя мощность потерь находятся по формулам $W=\Sigma W_j$, $P=W/T$. Однако и в этом случае вычисления остаются достаточно громоздкими.

Схему замещения можно еще более упростить, если пренебречь индуктивностью $L_э$. Такое допущение возможно, если на максимальной частоте спектра воздействующего напряжения ω_{max} сопротивление $\omega_{max}L_э$ окажется меньше, чем r_Σ. Тогда схема замещения примет весьма простой вид — последовательное соединение активного сопротивления r_Σ и емкости C_0. Для расчета потерь в такой схеме, которые в данном случае будут только потерями в металлических частях конструкции конденсатора, можно использовать методику, описанную выше для расчета потерь в диэлектрике, применяя, как и ранее, кусочно-линейную аппроксимацию $u(t)$. Очевидно, что получаемое при этом напряжение на емкости C_0 представляет собой напряжение на диэлектрике $u_д$, которое необходимо для расчета потерь в диэлектрике.

Наконец, при достаточно медленном изменении напряжения, воздействующего на конденсатор (ω_{max} мало), можно считать, что и сопротивление r_Σ не влияет на ток конденсатора (в схеме замещения на этапе определения тока остается только C_0), т. е. $u(t)=u_д(t)$. Тогда ток конденсатора на j-м участке линейной аппроксимации оказывается постоянным

$$I_j=C_0(du/dt)_j=C_0b_j. \qquad (4\text{-}51)$$

В этом случае мощность потерь в r_Σ определяется наиболее просто:

$$P_м = \frac{1}{T}\sum_{j=1}^{N}(C_0 b_j)^2 r_\Sigma \Delta t_j. \qquad (4\text{-}52)$$

Но при этом недопустимы скачки напряжения, иначе ток может оказаться бесконечно большим.

Индуктивность $L_э$ и сопротивление $r_э$, измеренные на частоте первого резонанса для конденсаторов средней и малой мощности, используемых в ТП, оказываются достаточно малыми (см. табл. 3-2), так что в большинстве случаев упрощения, описанные выше, допустимы.

Рассмотренные упрощения схемы замещения конденсатора, применяемые при расчете тока, можно использовать и в частотных методах определения потерь в металлических частях конструкции конденсатора.

4-4. РАСЧЕТ ПОТЕРЬ В КОНДЕНСАТОРАХ ПРИ ТИПОВЫХ ФОРМАХ НАПРЯЖЕНИЯ

Среди множества разнообразных форм напряжений и токов, воздействующих на конденсаторы ТП, можно выделить ряд типовых, наиболее часто встречающихся. Это такие формы, как трапеции с линейными или косинусоидальными фронтами, треугольные, пилообразные и гребенчатые.

Типовые формы напряжения характеризуются сравнительно малым числом параметров: U^+_{max} и U^-_{max} — положительная и отрицательная амплитуды (максимальные отклонения от среднего значения), размах $U_{п.п} = |U^+_{max}| + |U^-_{max}|$ длительности фронтов $t_{ф1}$, $t_{ф2}$, вершин $t_{в1}$, $t_{в2}$ и период повторения $T_п$ (см. рис. 1-4).

Строгий подход к оценке тепловыделения в конденсаторе требует учета температурной и частотной зависимостей емкости и $\operatorname{tg}\delta$. Возможные методы решения этой задачи даны в § 4-3. Однако численные методы, изложенные там, часто бывают неудобны при анализе, при проектировании и расчете новых устройств. Кроме того, если учесть возможный разброс электрических и теплофизических характеристик конденсаторов, то расчет

мощности потерь с погрешностью, составляющей 10—20%, может быть признан удовлетворительным для инженерной практики. Таким образом, задача состоит в получении в замкнутом виде выражений, определяющих приближенно мощность тепловых потерь при типовых формах напряжения на конденсаторе.

Как и ранее, будем отдельно определять потери в металлических частях конструкции конденсатора (выводах, контактных узлах, обкладках, корпусе и т. д.) и в диэлектрике.

Потери в металлических частях

Для приближенных расчетов потерь можно принять следующие допущения, упрощающие вычислительные формулы:

1) полагаем, что напряжение в диэлектрике совпадает с входным напряжением, т. е. пренебрегаем падением напряжения на $r_\Sigma(\omega)$ и $L_э$;

2) сопротивление $r_\Sigma(\omega)$ слабо зависит от частоты и его можно принять постоянным в диапазоне, где сосредоточена основная доля спектра мощности несинусоидального тока (см. § 4-1);

3) входная проводимость диэлектрика определяется емкостью C_0.

В соответствии с первым и третьим допущениями можно считать, что мгновенное значение тока

$$i = C_0 \frac{du}{dt}, \tag{4-53}$$

т. е. для напряжений с линейными фронтами ток имеет форму прямоугольных импульсов длительности $t_ф$ и амплитуды $C_0 U_{п.п}/t_ф$ при косинусоидальных фронтах — это полуволны синусоид длительности $t_ф$ и амплитуды $\pi C_0 U_{п.п}/2t_ф$ (см. рис. 1-4). Наконец, при экспоненциальных фронтах с постоянной времени τ ток также представляет собой экспоненциальный импульс с той же постоянной времени τ и амплитудой $C_0 U_{п.п}/\tau$.

На основании второго предположения можно записать:

$$P_м = \sum_{k=1}^{\infty} I^2_k r_\Sigma = r_\Sigma \sum_{k=1}^{\infty} I^2_k = r_\Sigma I^2, \tag{4-54}$$

где I — действующее значение несинусоидального тока, которое равно для косинусоидального фронта

$$I=\frac{\pi U_{\text{п.п}}C}{2\sqrt{2}\,T_{\text{п}}}\sqrt{T_{\text{п}}/t_{\text{ф1}}+T_{\text{п}}/t_{\text{ф2}}}; \qquad (4\text{-}55)$$

для линейного фронта

$$I=\frac{U_{\text{п.п}}C}{T_{\text{п}}}\sqrt{T_{\text{п}}/t_{\text{ф1}}+T_{\text{п}}/t_{\text{ф2}}}; \qquad (4\text{-}56)$$

откуда при равных длительностях фронтов $t_{\text{ф1}}=t_{\text{ф2}}$

$$I=\frac{\pi U'_{\text{п.п}}C}{2}\sqrt{f_{\text{п}}/t_{\text{ф}}};$$

$$I=\sqrt{2}\,U_{\text{п.п}}C\sqrt{f_{\text{п}}/t_{\text{ф}}}$$

соответственно для косинусоидального и линейного фронтов.

Если фронты напряжения имеют различную форму, то действующее значение тока равно:

$$I=\frac{U_{\text{п.п}}C}{T_{\text{п}}}\sqrt{\frac{\pi^2 T_{\text{п}}}{8t_{\text{ф1}}}+\frac{T_{\text{п}}}{t_{\text{ф2}}}}, \qquad (4\text{-}57)$$

при этом $t_{\text{ф1}}$ — длительность косинусоидального фронта, а $t_{\text{ф2}}$ — линейного.

Сопротивление r_{Σ} (см. § 3-1) определяется из сопоставления потерь всего конденсатора и его активного диэлектрика на частоте $\omega'=\pi/t'_{\text{ф}}$, где $t'_{\text{ф}}$ — минимальная продолжительность импульса рабочего тока конденсатора:

$$r_{\Sigma}(\omega')=\frac{\operatorname{tg}\delta(\omega')-\operatorname{tg}\delta_{\text{д}}(\omega')}{\omega' C(\omega')},$$

здесь $\operatorname{tg}\delta(\omega')$ и $\operatorname{tg}\delta_{\text{д}}(\omega')$ — значения тангенса угла потерь соответственно конденсатора и его диэлектрика; $C(\omega')$ — емкость конденсатора при последовательной схеме замещения, полученная экспериментально на частоте ω'.

Такой расчет мощности потерь при близких длительностях фронтов ($t_{\text{ф1}}\approx t_{\text{ф2}}$) приводит к занижению потерь в металлических частях конденсатора, так как сопротивление $r_{\Sigma}(\omega)$ реального конденсатора растет с увеличением частоты. Как показывают точные расчеты в соответствии

с (4-35), выполненные, например, для конденсаторов типа МБГЧ, имеющих значительную зависимость $r_\Sigma(\omega)$ от частоты [3-8], допущение $r_\Sigma(\omega')=\text{const}$ приводит к занижению потерь не более чем на 10—15%.

При существенно отличающихся продолжительностях протекания тока ($t_{ф1} \gg t_{ф2}$ или $t_{ф2} \gg t_{ф1}$) приближенный метод приводит к завышению потерь примерно в тех же пределах. Это связано с тем, что при разных длительностях возрастает доля вклада «низкочастотных» гармоник тока, тогда как сопротивление $r_\Sigma(\omega)$ берется на более высокой частоте $\omega'=\pi/(t_ф)_{min}$.

При малых длительностях фронтов $t_ф$ может оказаться нарушенным первое предположение. Тогда следует учесть влияние на форму тока и, следовательно, на форму напряжения, воздействующего на диэлектрик, последовательных элементов r_Σ и $L_э$.

Точный учет этих элементов может быть выполнен с применением частотных или временны́х методов расчета, как это показано в предыдущем параграфе.

Для приближенных вычислений эти элементы можно не учитывать при $t'_ф > \max\{2L_э/r_\Sigma,\ r_\Sigma C_0\}$ (параметры $L_э$, $r_э$ и C_0 определяются на частоте первого собственного резонанса конденсатора) и считать $t'_ф$ равной длительности переходного процесса $t_п$ в цепи r_Σ, $L_э$, C_0 в случае более коротких фронтов.

За эквивалентную длительность фронта можно принять $t_п=4L_э/r_\Sigma$ в случае критического режима заряда конденсатора ($r_\Sigma=2\sqrt{L_э/C_0}$) или близкого к нему и время $t_п=1{,}5r_\Sigma C_0$ в случае апериодического заряда.

Для случая воздействия на конденсатор скачка напряжения с амплитудой U_{max} и $t_ф=0$ потери в металлических частях конструкции конденсатора, пренебрегая частотной зависимостью r_Σ, можно найти по формуле

$$W=C_0U^2_{max}/2, \qquad (4\text{-}58)$$

так как при любом характере переходного процесса энергия, выделившаяся в последовательном активном сопротивлении r_Σ, $L_э$, C_0-цепи равна энергии электрического поля, накопленной в емкости C_0. При этом пред-

полагается, что длительность скачка достаточно велика, чтобы процессы заряда или разряда конденсатора успевали закончиться.

Суммируя потери энергии в металлических частях за период, можно вычислить мощность потерь

$$P_{\text{м}}=2W/T_{\text{п}}=C_0U^2_{\text{п.п}}/T_{\text{п}}. \qquad (4\text{-}59)$$

Если переходные процессы заряда или разряда за время $t_{\text{в}}$ не успевают закончиться, то потери энергии в металлических частях конденсатора можно вычислить по приближенной формуле при $t_{\text{в}}>2L_{\text{э}}/r_{\Sigma}$

$$W=\frac{C_0U^2_{\text{п.п}}}{2}\left(1-e^{-\frac{r_{\Sigma}}{L_{\text{э}}}t_{\text{в}}}\right). \qquad (4\text{-}60)$$

Средняя мощность потерь получается в результате суммирования энергий на отдельных участках.

Учет потерь в металлических частях конденсаторов особенно важен для демпфирующих и коммутирующих конденсаторов тиристорных преобразователей, подверженных действию импульсных токов большой амплитуды, способных вызвать значительные локальные превышения температуры конструкции конденсатора.

Потери в диэлектрике

Как показано в предыдущем параграфе, потери энергии в диэлектрике определяются суммой потерь от каждой из гармоник воздействующего на диэлектрик напряжения [1]

$$P_{\text{д}}=\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{2}(A^2_k+B^2_k)\,k\Omega C_k\,\text{tg}\,\delta_{\text{д}k}, \qquad (4\text{-}61)$$

где A_k, B_k — коэффициенты разложения в ряд Фурье кривой $u_{\text{д}}(t)$; $\Omega=2\pi/T_{\text{п}}$ — угловая частота повторения; k — номер гармоники; C_k — емкость диэлектрика при параллельной схеме замещения; $\text{tg}\,\delta_{\text{д}k}$ — его тангенс угла потерь на частоте k-й гармоники.

Для упрощения расчетов суммы (4-61) примем следующие допущения:

[1] Часто бывает удобно суммировать потери от гармоник тока через конденсатор, если последний имеет импульсный характер, так как более просто осуществляется разложение в ряд Фурье.

1) пренебрегаем влиянием последовательного активного сопротивления $r_э$ и индуктивности $L_э$ на емкость C_k и форму напряжения $u_д(t)$;

2) будем считать, что тангенс угла потерь диэлектрика не зависит от частоты, т. е. $\operatorname{tg}\delta_{дk}=\operatorname{tg}\delta_д=\text{const}$;

3) емкость диэлектрика C_k не зависит от частоты и равна емкости конденсатора, измеренной на низких или средних частотах.

При этих допущениях напряжение $u_д(t)$ совпадает с напряжением на конденсаторе $u(t)$ и выражение (4-61) примет вид:

$$P_д=\frac{1}{8}U^2_{п.п}\Omega C\operatorname{tg}\delta_д\sum_{k=1}^{\infty}k(a^2_k+b^2_k), \qquad (4\text{-}62)$$

где a_k, b_k — коэффициенты разложения в ряд Фурье нормированной кривой напряжения $\Phi(t)=2u(t)/U_{п.п}$. Размах этой кривой, очевидно, равен 2.

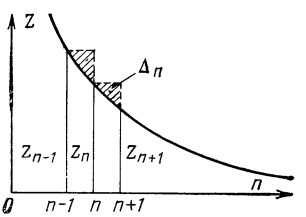


Рис. 4-6. К определению $\sum_{n=1}^{\infty} z(n)$.

Задача состоит в нахождении в замкнутом виде суммы ряда (4-62) для стандартных форм кривых. Множитель k замедляет сходимость этого ряда, что приводит к необходимости вычисления большого числа его членов.

Для ускорения сходимости применим следующий прием [4-18—4-20]. На рис. 4-6 изображена непрерывная функция $Z(n)=k(a^2_k+b^2_k)$, причем $k=n$, если разложение содержит как четные, так и нечетные гармоники, $k=2n-1$, если ряд Фурье не содержит четных гармоник и $k=2n$ при наличии только четных гармоник. Значения Z_n, равные соответствующим членам суммы (4-62), получаются из $Z(n)$ при $n=1, 2 \ldots$ На этом рисунке они изображены сплошными вертикальными линиями. Тогда, как видно из рисунка, для суммы Z_n можно записать следующее выражение:

$$\sum_{n=1}^{\infty}Z_n=\int_1^{\infty}Z(n)\,dn+\sum_{n=1}^{\infty}\Delta_n, \qquad (4\text{-}63)$$

где $\sum_{n=1}^{\infty} \Delta_n$ представляет собой погрешность, появляющуюся при замене ряда интегралом.

Очевидно, что

$$\Delta_n = Z_n - \int_n^{n+1} Z(n)\,dn = Z_n - y_n \qquad (4\text{-}64)$$

и ряд

$$\sum_{n=1}^{\infty} \Delta_n = \sum_{n=1}^{\infty} Z_n - \int_1^{\infty} Z(n)\,dn = \sum_{n=1}^{\infty} (Z_n - y_n) \qquad (4\text{-}65)$$

оказывается значительно более быстро сходящимся, так как Z_n и y_n убывают с одинаковой скоростью и при $n \to \infty$ $y_n \to Z_n$ в силу непрерывности функции $Z(n)$.

При достаточно большом $n=m$ можно считать, что Δ_n становится равной площади прямоугольного треугольника

$$\Delta_n \approx \frac{1}{2}(Z_n - Z_{n+1}). \qquad (4\text{-}66)$$

Тогда, используя (4-66), можно записать:

$$\sum_{n=m}^{\infty} \Delta_n \approx \frac{1}{2}\left[\sum_{n=m}^{\infty} Z_n - \sum_{n=m}^{\infty} Z_{n+1}\right] = \frac{1}{2} Z_m. \qquad (4\text{-}67)$$

Сумму (4-65) можно представить в виде

$$\sum_{n=1}^{\infty} \Delta_n = \sum_{n=1}^{m-1} Z_n - \int_1^{m} Z(n)\,dn + \sum_{n=m}^{\infty} \Delta_n \qquad (4\text{-}68)$$

или с учетом (4-67)

$$\sum_{n=1}^{\infty} \Delta_n \approx \sum_{n=1}^{m-1} Z_n + \frac{1}{2} Z_m - \int_1^{m} Z(n)\,dn. \qquad (4\text{-}69)$$

Эта сумма подсчитывается при нескольких значениях $m=2, 3\ldots$ до тех пор, пока она практически не перестанет изменяться. После нахождения суммы (4-69) и выполнения интегрирования для каждой конкретной формы напряжения получается аналитическое выражение суммы (4-63), входящей в выражение для мощности потерь (4-62).

Пример. В качестве примера рассмотрим случай напряжения симметричной трапецеидальной формы с линейными фронтами (см. рис. 1-4,*б*) при $t_{ф1}=t_{ф2}=t_ф$ и $t_{в1}=t_{в2}=T_п/2-t_ф$. Для такой формы напряжения получаем выражение

$$Z(n)=\frac{16\sin^2[\alpha(2n-1)]}{\pi^2(2n-1)^2\alpha^2}, \tag{4-70}$$

где $\alpha=\pi t_ф/T_п$

Интеграл $\int_1^\infty Z(n)\,dn$ находим, подставляя $\sin^2[\alpha(2n-1)]=$ $=\frac{1}{2}\{1-\cos[2\alpha(2n-1)]\}$ и интегрируя по частям

$$\int_1^\infty Z(n)\,dn=\frac{8}{\pi^2}\left[\frac{\sin^2\alpha}{2\alpha^2}+\frac{\sin 2\alpha}{2\alpha}+\int_\alpha^\infty\frac{\cos[2\alpha(2n-1)]}{\alpha[2n-1]}\,d(2n-1)\alpha\right]. \tag{4-71}$$

Примем еще одно допущение: длительность фронта мала по сравнению с периодом повторения $t_ф\ll T_п$. Тогда для малых значений

$$\alpha=\pi\frac{t_ф}{T_п}\quad \frac{\sin^2\alpha}{\alpha^2}\approx 1,\quad \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha}\approx 1,$$

а интегральный косинус $-\int_{2\alpha}^\infty\frac{\cos x}{x}dx$ хорошо аппроксимируется функцией $-\ln\frac{1}{2\alpha}+0{,}577$. При этих условиях

$$\int_1^\infty Z(n)\,dn=\frac{8}{\pi^2}\left(0{,}923+\ln\frac{1}{2\alpha}\right). \tag{4-72}$$

В соответствии с (4-69) и (4-70)

$$\sum_{n=1}^\infty\Delta_n\cong\frac{16}{\pi^2\alpha^2}\left\{\sum_{n=1}^{m-1}\frac{\sin^2[\alpha(2n-1)]}{(2n-1)^3}+\frac{1}{2}\frac{\sin^2[\alpha(2m-1)]}{(2m-1)^3}-\right.$$
$$\left.-\int_1^m\frac{\sin[\alpha(2n-1)]}{(2n-1)^3}\,dn\right\}.$$

или с учетом принятого допущения о малости α

$$\sum_{n=1}^\infty\Delta_n\approx\frac{16}{\pi^2}\left\{\sum_{n=1}^{m-1}\frac{1}{2n-1}+\frac{1}{2(2m-1)}-\frac{1}{2}\ln(2m-1)\right\}. \tag{4-73}$$

Сумма, заключенная в фигурные скобки, легко может быть вычислена при каждом m и с возрастанием m довольно быстро сходится к значению 0,63. Тогда для ряда $\sum_{n=1}^{\infty} Z_n = \sum_{k=1}^{\infty} a^2_k k$ (4-70) получим:

$$\sum_{n=1}^{\infty} Z_n = \frac{8}{\pi^2}\left[2{,}183 + \ln\frac{1}{2\alpha}\right]. \qquad (4\text{-}74)$$

Подставляя $\alpha = \pi\frac{t_ф}{T_п}$ и (4-74) в (4-62), получаем окончательную формулу для мощности потерь в диэлектрике при симметричном трапецеидальном напряжении с линейными фронтами

$$P_д = \frac{U^2_{п.п} C \operatorname{tg}\delta_д}{4T_п}\left(0{,}9 + 5{,}88 \lg\frac{T_п}{t_ф}\right). \qquad (4\text{-}75)$$

При возрастании $t_ф/T_п$ погрешность возрастает и достигает максимума при $t_ф/T_п = 0{,}5$, т. е. при треугольной форме напряжения ($t_{в1} = t_{в2} = 0$, $t_{ф1} = t_{ф2} = T_п/2$).

Согласно (4-75) $P_д$ в этом случае равно $\frac{2{,}68}{4T_п} U^2_{п.п} C \operatorname{tg}\delta_д$, тогда как рассчитанное изложенным выше способом для треугольной формы $[a_k = 8/\pi^2 (2n-1)^2]$ значение $P_д = \frac{2{,}15}{4T_п} U^2_{п.п} C \operatorname{tg}\delta_д$, т. е. даже в этом случае ошибка не превосходит 25 %, следовательно, принятое выше условие малости $\alpha = \pi t_ф/T_п$ не является слишком жестким.

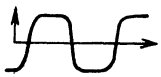
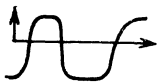
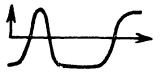
В табл. 4-3 приведены формулы для приближенного расчета мощности потерь в диэлектрике при типовых формах напряжения, полученные по приведенной выше методике, а также значения коэффициента увеличения потерь при несинусоидальном напряжении по отношению к потерям при напряжении синусоидальной формы с тем же размахом и частотой повторения ($U_{п.п} = 2U_m$), $k_п = P_{несин}/P_{син}$.

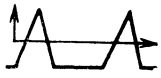
Пример. Определим потери в диэлектрике конденсатора МБГЧ при следующих условиях: $U_{п.п} = 10^3$ В, $C = 1{,}0$ мкФ, $T_п = 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ с, $t_{ф1} = t_{ф2} = 10^{-4}$ с и $t_{в1} = t_{в2}$ — фронты косинусоидальной формы; $\operatorname{tg}\delta_{ср} \approx 10^{-2}$, $T_п/t_ф = 2{,}5 \cdot 10^{-3}/10^{-4} = 25$, тогда мощность потерь $P_д = \frac{1{,}5 \cdot (10^3)^2}{2{,}5 \cdot 10^{-3}} \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-2} \lg 1{,}8 \cdot 25 = 9{,}9$ Вт.

При $U = 10^3/2\sqrt{2}$, $f_п = 400$ Гц и синусоидальной форме напряжения

$$P_д = U^2 \omega C \operatorname{tg}\delta_д = \left(\frac{10^3}{2\sqrt{2}}\right)^2 2\pi \cdot 400 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}6 \cdot 10^{-2} = 1{,}9 \text{ Вт}.$$

Таблица 4-3

Форма напряжения	Параметры	Мощность потерь в диэлектрике, Вт	Средняя частота, Гц	Коэффициент увеличения потерь, $k_п$
	$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$ $t_{в1} = t_{в2}$	$\frac{1,5}{T_п} U^2_{п.п} C \operatorname{tg} \delta_{ср} \lg 1,8 \frac{T_п}{t_ф}$	$\sqrt{\frac{1}{2T_п t_ф}}$	$1,9 \lg 1,8 \frac{T_п}{t_ф}$
	$t_{ф1} = t_{ф2}$ $t_{в1} \neq t_{в2}$	$\frac{1,4}{T_п} U^2_{п.п} C \operatorname{tg} \delta_{ср} \lg \frac{t_{в1} + t_ф}{0,17 t_ф}$	$(2t_ф T_п)^{-\frac{1}{2}} \div \frac{0,3}{t_ф}$	$1,8 \lg \frac{t_{в1} + t_ф}{0,17 t_ф}$
	$t_{ф1} = t_{ф2}$ $t_{в1} = 0$	$\frac{1,1}{T_п} U^2_{п.п} C \operatorname{tg} \delta_{ср}$	$\frac{0,3}{t_ф}$	1,4
	$t_{ф1} = t_{ф2}$ $t_{в1} = t_{в2}$	$\frac{1,5}{T_п} U^2_{п.п} C \operatorname{tg} \delta_{ср} \lg 1,4 \frac{T_п}{t_ф}$	$(2T_п t_ф)^{-\frac{1}{2}}$	$1,9 \lg 1,4 \frac{T_п}{t_ф}$

	$t_{ф1} = t_{ф2}$ $t_{в1} \neq t_{в2}$	$\frac{1,4}{T_п} U^2_{п.п} C \operatorname{tg} \delta_{ср} \lg \frac{t_{в1} + t_ф}{0,22 t_ф}$	$(2T_п t_ф)^{-\frac{1}{2}} \div \frac{0,3}{t_ф}$	$1,8 \lg \frac{t_{в1} + t_ф}{0,22 t_ф}$
	$t_{ф1} = t_{ф2}$ $t_{в1} = 0$	$\frac{0,9}{T_п} U^2_{п.п} C \operatorname{tg} \delta_{ср}$	$\frac{0,3}{t_ф}$	1,1
	$t_{ф1} = t_{ф2} = T_п/2$ $t_{в1} = t_{в2} = 0$	$\frac{0,54}{T_п} U^2_{п.п} C \operatorname{tg} \delta_{ср}$	$\frac{1}{T_п}$	0,7
	$t_{ф1} > t_{ф2} = t_ф$ $t_{в1} = t_{в2} = 0$	$\frac{0,73}{T_п} U^2_{п.п} C \operatorname{tg} \delta_{ср} \left(\frac{T_п}{T_п - t_ф}\right)^2 \times$ $\times \lg 0,7 \frac{T_п}{t_ф}$	$\frac{1}{T_п} \div \frac{0,11}{t_ф}$	$0,93 \left(\frac{T_п}{T_п - t_ф}\right)^2 \times$ $\times \lg 0,7 \frac{T_п}{t_ф}$
	$t_{ф1} + t_{в1} = t_{ф2} +$ $+ t_{в2} = t_{ф3} + t_{в3}$	$\frac{1,1}{T_п} U^2_{п.п} C \operatorname{tg} \delta_{ср} \lg 1,2 \frac{T_п}{t_ф}$	$(2T_п t_ф)^{-\frac{1}{2}}$	$1,4 \lg 1,2 \frac{T_п}{t_ф}$

Область применимости полученных формул определяется, с одной стороны, границами, в которых выполняются принятые допущения, а с другой — погрешностью, возникающей при нарушении этих допущений.

При малых длительностях фронтов, когда $t_ф < 2L_э/r_Σ$ [1] или $t_ф < r_Σ C_0$, форма напряжения, воздействующего на диэлектрик, будет отличаться от формы напряжения, приложенного к конденсатору, а ток конденсатора будет отличен по значению и форме от изображенного на рис. 1-4. Следствием этого явится завышение потерь, рассчитанных по формулам табл. 4-3 по сравнению с действительными. Также завышенными будут потери в металлических частях конденсатора. В предельном случае при $t_ф \to 0$ получаются бесконечно большие потери для пилообразных и трапецеидальных форм напряжения и некоторые отличные от нуля потери для гребенчатых форм. На самом деле в первом случае потери имеют конечное значение, а во втором — нулевое, поскольку при этом гребенчатая форма вырождается, превращаясь в постоянное напряжение.

В таких случаях можно принять $t'_ф = \min\left\{\frac{4L_э}{r_э},\ 2r_э C_0\right\}$,

при этом погрешность расчета $P_м$ и $P_д$ по предложенным формулам не превышает 15—20%.

Для напряжений с экспоненциальными фронтами, представляющих большой практический интерес, можно применять формулы табл. 4-3, полагая в них $t_ф = 1{,}5\tau$, где τ — постоянная времени цепи заряда или разряда конденсатора. При этом погрешность расчета мощности, как показали непосредственные вычисления, не превышает 10%.

При разной длительности фронтов напряжений трапецеидальной формы можно также использовать формулы табл. 4-3, полагая при этом

$$\left.\begin{aligned} t_ф &= (t_{ф1} + t_{ф2})/2 \text{ при } t_{ф\,max}/t_{ф min} < 5; \\ t_ф &= (t_{ф1} + t_{ф2})/3 \text{ при } t_{ф max}/t_{ф min} > 5. \end{aligned}\right\} \qquad (4\text{-}76)$$

Ошибка вычисления мощности потерь в этом случае также не превышает 10—15%. Влияние формы фронтов на потери существенно проявляется при малых $T_п/t_ф$, поэтому для трапецеидаль-

[1] Значение $L_э$ может быть определено по частоте первого резонанса конденсатора.

ных напряжений, имеющих различные виды фронтов, потери можно приближенно определить по формулам табл. 4-3 для косинусоидальной формы фронтов, с которой связаны наибольшие потери, при прочих равных условиях для всех рассмотренных видов напряжений.

Одним из основных допущений, принятых в данном параграфе, является постоянство $\operatorname{tg}\delta_д$ и емкости диэлектрика конденсатора в диапазоне частот при типовых формах напряжения. Нижней границей этого диапазона является частота первой гармоники или частота повторения $\Omega=2\pi/T_п$.

Верхней границей диапазона может быть принята частота $\omega=\pi/t_ф$ для трапецеидальных и пилообразных форм напряжения (в этом диапазоне сосредоточено примерно 90% всего спектра мощности). В случае малых $t_ф$, как отмечено выше, вместо $t_ф$ следует использовать $t'_ф$.

Для конденсаторов с неполярным или слабополярным диэлектриком (типов К71-4, К72-11, ПЖ и др.) уменьшением емкости и изменением $\operatorname{tg}\delta_д$ в диапазоне частот, встречающихся на практике форм напряжений, можно пренебречь.

Полярные диэлектрики (в конденсаторах типов МБГЧ, ЛС, К73) имеют значительную частотную зависимость $\operatorname{tg}\delta_д$ в этом диапазоне частот. Спад емкости в этом диапазоне, обусловленный ослаблением поляризации, существенно меньше, поэтому им можно пренебречь, тем более что конденсаторы с полярным диэлектриком применяются преимущественно на низких частотах при относительно больших длительностях фронтов. Изменение значения $\operatorname{tg}\delta_д$ с частотой может быть приближенно учтено, если в (4-62) брать значение $\operatorname{tg}\delta_д$ на некоторой средней частоте $f_{ср}$, которая делит спектр мощности напряжения на две равные части [4-20]. Значения средних частот приведены в табл. 4-3. При неравных длительностях вершин можно использовать для приближенного нахождения средней частоты линейную интерполяцию

$$f_{ср}=\frac{0{,}3}{t_ф}\left(\frac{|t_{в1}-t_{в2}|}{|t_{в1}+t_{в2}|}\right)+\sqrt{\frac{1}{T_п t_ф}}\left(1-\frac{|t_{в1}-t_{в2}|}{|t_{в1}+t_{в2}|}\right). \qquad (4\text{-}77)$$

Полученные результаты можно применить также для расчета потерь при однополярной форме напряжения или в общем случае при наличии постоянной составляющей. В этих случаях необходимо учитывать только переменную составляющую напряжения на конденсаторе. Для конденсаторов, у которых наблюдается эффект Гартона, для более точных расчетов необходимо учесть влияние постоянной составляющей на $\operatorname{tg}\delta_д$ (см. § 2-1).

Большой практический интерес представляет анализ зависимости мощности потерь в конденсаторах и ее двух основных составляющих ($P_д$ и $P_м$) от параметров формы типовых напряжений.

Можно выделить следующие случаи изменения параметров формы:

1) $T_п$=const, $t_{в1}/T_п$=const, $t_ф$=var (изменяется длительность фронтов);

2) $t_ф$=const, $T_п$=var (изменяется частота повторения);

3) $T_п/t_ф$=const, $t_{в1}$=var (изменяется скважность).

На рис. 4-7 показаны зависимости коэффициентов увеличения мощности потерь в диэлектрике с $\operatorname{tg}\delta$=const при напряжении трапецеидальной формы с косинусоидальными и линейными фронтами

одинаковой продолжительности при различной относительной продолжительности вершин ($t_{в*}=t_{в1}/T_п$) от отношения $T_п/t_ф$. Зависимости рис. 4-7 получены с применением гармонического анализа кривых $u(t)$ и частотного метода расчета потерь [4-29]. Сопоставление полученных зависимостей с формулами табл. 4-3 показывает, что заметное расхождение между ними возникает при $T_п/t_ф<3$ (приближенные формулы табл. 4-3 дают завышенные значения).

В точке A (рис. 4-7) трапецеидальное напряжение с косинусоидальной формой фронтов вырождается в синусоидальное напряжение, а в точке B напряжение с линейными фронтами — в напряжение треугольной симметричной формы.

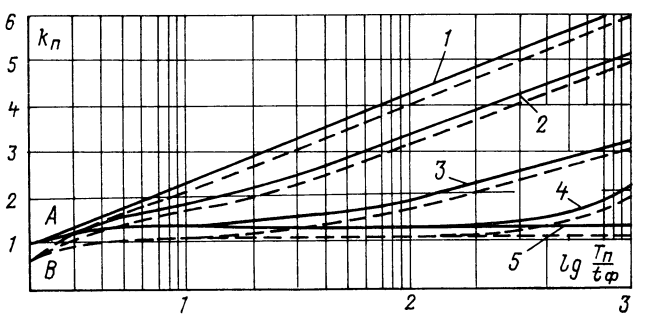


Рис. 4-7. Зависимости коэффициентов увеличения мощности потерь от параметров формы трапецеидального напряжения с косинусоидальным (———) и линейным (— — — —) фронтами ($t_{ф1}=t_{ф2}=t_ф$). *1* — $t_{в1*}=t_{в2*}=t_{в*}=t_в/T_п=0{,}5-t_{ф*}$; *2* — $t_{в1*}=0{,}1$; *3* — $t_{в1*}=10^{-2}$; *4* — $t_{в1*}=10^{-3}$; *5* — $t_{в1*}=0$.

Из зависимостей рис. 4-7 (так же, как из формул табл. 4-3) следует, что при $t_ф\longrightarrow 0$ потери в диэлектрике бесконечно возрастают. Это является следствием допущения $\operatorname{tg}\delta_д=\text{const}$ и $C=\text{const}$ при $\Omega\leqslant\omega\longrightarrow\infty$. В реальных диэлектриках вследствие ослабления поляризации с повышением частоты происходит уменьшение емкости в пределе до значения C_0, а $\operatorname{tg}\delta_д$ становится равным нулю при $\omega>2\pi(10^{14}-10^{15})$. Вследствие этого мощность потерь при $t_ф=0$ в реальных диэлектриках принимает вполне определенное конечное значение. Приближенно это значение можно определить, прибегнув к схеме замещения с постоянными параметрами (см. рис. 4-2). Так как при $t_ф=0$ на диэлектрик воздействует прямоугольное напряжение [1], то мощность потерь, достигающая максимума при $t_{в1}=$

[1] Для физической реализации такого режима необходимы источник с нулевым внутренним сопротивлением и конденсатор с нулевыми активными и индуктивными последовательными сопротивлениями.

$=t_{в2}=T_п/2$, применяя формулу Гросса [4-21] для всех RC-цепочек схемы рис. 4-4, равна:

$$P_д=\frac{2U^2_{п.п}}{T_п}\sum_{i=1}^{m}\frac{C_i\,(1-e^{-T_п/\tau_i})}{1+e^{-T_п/\tau_i}}, \qquad (4\text{-}78)$$

где C_i — емкость i-го релаксатора в схеме замещения диэлектрика (см. рис. 4-2).

Учитывая, что для тех релаксаторов, у которых $\tau_i \ll T_п$, $P_i=\frac{2U^2_{п.п}}{T_п}C_i$, формулу (4-78) можно преобразовать к виду

$$P_д=\frac{2U^2_{п.п}}{T_п}\left(\sum_{i=n}^{m}C_i+\sum_{i=1}^{n-1}\frac{C_i\,(1-e^{-T_п/\tau_i})}{1+e^{-T_п/\tau_i}}\right], \qquad (4\text{-}79)$$

где n — номер релаксатора, у которого $\tau_n \ll T_п$.

Так как число релаксаторов (R_iC_i-цепочек) в схеме замещения диэлектрика (рис. 4-2) конечно [полагая, например, $\alpha^2=10$ при $\omega_{max}=2\pi\cdot10^{16}$ и $\omega_{min}=2\pi\cdot10$, их число согласно (4-22) составит $m=16$], максимально возможная мощность потерь при заданном $T_п$ согласно (4-79) принимает вполне определенное значение[1]. При этом в (4-79) принимаются во внимание только релаксаторы, у которых $\tau_i \leqslant T_п$, поскольку при $\tau_i \gg T_п$ $(1-e^{-T_п/\tau_i})\approx 0$. Учитывая, что число релаксаторов, у которых τ_i соизмеримо с $T_п$, всего два или три (при декадном распределении $\omega_i=1/\tau_i$), с небольшим завышением

$$(P_д)_{max}=\frac{2U^2_{п.п}}{T_п}\sum_{i=1}^{m}C_i.$$

Используя значения параметров схемы замещения, можно найти максимальную мощность тепловыделения в различных диэлектриках при напряжении прямоугольной формы. Например, при $C_0=10^{-6}$ Ф, $U_{п.п}=10^3$ В и $T_п=10^{-2}$ с максимальная мощность тепловыделения в диэлектрике составит

$$(P_д)_{max}=\frac{2\cdot10^6}{10^{-2}}\cdot48\cdot10^{-4}\cdot10^{-6}=0{,}96 \text{ Вт (для ПТФЭ)}.$$

---

[1] Следует отметить, что при прямоугольной форме напряжения воздействующего на реальный конденсатор, максимальные потери возникают не в диэлектрике, а в металлических частях конструкции, поскольку $P_м=\frac{2U^2_{п.п}}{T_п}C_0$ и $C_0 \gg \sum_{i=1}^{m}C_i$, при этом должно быть $T_п \gg r_Σ C_0$.

При пилообразной форме, когда $t_{\Phi} \longrightarrow 0$, потери в диэлектрике приближенно определяются соотношением

$$P_{д max} \approx \frac{U^2_{п.п}}{T_п} \sum_{i=1}^{m} C_i,$$

т. е. они примерно в 2 раза ниже, чем при прямоугольном напряжении тех же амплитуды и частоты.

Зависимость мощности тепловыделения в диэлектрике от частоты при $t_{\Phi}=\text{const}$ и $t_{в*}=\text{const}$ при симметричной форме ($t_{в1*}=t_{в2*}$) и $\operatorname{tg}\delta=\text{const}$ согласно формулам табл. 4-3 отличается от линейной вследствие изменения логарифмического множителя с частотой. На двух декадах по частоте это расхождение может быть более, чем двукратное, а на трех — семикратное. Отступление от линейного закона изменения мощности потерь с частотой тем больше, чем меньше отношение $T_п/t_{\Phi}$. Для полярных диэлектриков, у которых $\operatorname{tg}\delta_д$ заметно растет с частотой, зависимость потерь от частоты ближе к линейной, поскольку с увеличением частоты снижение логарифмического множителя компенсируется возрастанием $\operatorname{tg}\delta_{ср}$ (см. табл. 4-3) за счет увеличения $\operatorname{tg}\delta_д$ с ростом $f_{ср}$. В определенном диапазоне частот $\operatorname{tg}\delta$ полярных диэлектриков настолько быстро растет с частотой (около двух крат на декаду), что рост потерь с частотой при трапецеидальной форме и приведенных выше условиях становится даже более быстрой, чем линейная. Однако для этого диапазона частот (10^4—10^5 Гц — бумажный диэлектрик, 10^3—10^5 Гц — ПЭТФ) конденсаторы с полярными диэлектриками обычно не применяются. При гребенчатой форме напряжения (см. рис. 1-4,*г*) потери $P_д$ растут линейно с увеличением частоты (при $\operatorname{tg}\delta=\text{const}$).

В ряде практических случаев применения конденсаторов, например в ТП с широтно-импульсным регулированием напряжения, изменяется длительность одной из вершин (см. рис. 1-4,*а* или *в*) при $t_{\Phi}=\text{const}$ и $f_п=\text{const}$, т. е. изменяется скважность импульсного напряжения. Из кривых рис. 4-7 видно, что максимальные потери при прочих равных условиях достигаются при $t_{в1*}=t_{в1}/T_п=0{,}5-t_{\Phi*}$, т. е. при симметричной трапецеидальной форме, тогда как минимальные потери имеют место при $t_{в1*}=0$, т. е. при гребенчатой форме напряжения.

Потери при других значениях $t_{в1*}$ находятся в промежутке между этими экстремальными значениями и определяются формулами, приведенными в табл. 4-3. На рис. 4-8 изображены зависимости относительной величины потерь от $t_{в1*}$. Кривые $P_{д*}$ симметричны относительно $t_{в1*}=0{,}5-t_{ф*}$, поскольку форме напряжения при $t_{в1*}<0{,}5-t_{ф*}$ соответствует такая же, но зеркально отображенная форма при $t_{в1*}>0{,}5-t_{ф*}$, имеющая тот же спектр гармоник.

В практических случаях применения регулируемых ТП часто встречаются режимы работы конденсаторов, когда частота, скважность или и то и другое изменяются по какому-либо закону. Необходимо дать оценку средней за некоторый интервал T мощности потерь в диэлектрике.

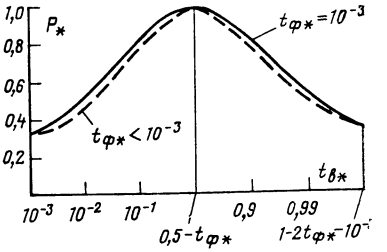


Рис. 4-8. Зависимость относительных потерь от относительной длительности вершины $t_{в1*}=t_в/T_п$ при напряжении трапецеидальной формы с косинусоидальными фронтами одинаковой продолжительности ($t_{ф1}=t_{ф2}$).

Для этого можно использовать, например, численные методы расчета потерь энергии, изложенные в § 4-2.

При простых законах изменения параметров формы напряжения во времени, например в случае, если частота или $t_в$ являются линейными функциями времени, можно получить следующие приближенные формулы для вычисления потерь в диэлектрике[1]:

$$P_д = 1{,}5U^2_{п.п}C\operatorname{tg}\delta\left[f'\frac{2{,}97}{t_ф f_1}-\frac{f_1k^2\lg k}{2(k-1)}\right], \qquad (4\text{-}80)$$

где $f'=(f_1+f_2)/2$; $k=f_2/f_1$, f_1, f_2 — минимальная и максимальная частоты повторения при частотном регулировании и симметричной трапецеидальной форме напряжения с косинусоидальными фронтами, и

[1] Потери в токоведущих металлических частях конструкции конденсатора в таких режимах определяются через действующее значение тока (I=const при $f_п$=const) I=var при $f_п$ и $t_ф$=var.

в случае широтно-импульсного регулирования

$$P_{\text{д}} = 1{,}4U^2_{\text{п.п}} C f_{\text{п}} \operatorname{tg}\delta \lg\left(e^{\frac{l}{l-1}} \frac{t_{\text{в}min} + t_{\text{ф}}}{0{,}334 t_{\text{ф}}}\right), \qquad (4\text{-}81)$$

где $l = \dfrac{t_{\text{в}max} + t_{\text{ф}}}{t_{\text{в}min} + t_{\text{ф}}}$.

При частотном регулировании ТП с гребенчатой формой напряжения (см. рис. 1-4,*г*) средняя мощность потерь в случае линейного закона регулирования частоты равна:

$$P_{\text{д}} = 0{,}55U^2_{\text{п.п}} C \operatorname{tg}\delta_{\text{д}} (f_2 + f_1). \qquad (4\text{-}82)$$

Современные конструкции конденсаторов используют высококачественные диэлектрики, в связи с чем возрастает доля потерь в металлических частях конструкции.

Полагая приближенно сопротивление r_Σ в схеме замещения конденсатора на рис. 4-5 постоянным, потери в этом сопротивлении при типовых формах напряжения находим по (4-54). При этом r_Σ определяем для частоты $\omega' = \pi / t_{\text{ф}}$, используя, например, данные табл. 3-2.

Действующее значение тока при прочих равных условиях не зависит от длительности вершин $t_{\text{в}1}$ и $t_{\text{в}2}$ и пропорционально $\sqrt{f_{\text{п}}/t_{\text{ф}}}$ (при $t_{\text{ф}1} = t_{\text{ф}2}$ или гребенчатой форме напряжения), поэтому потери в токоведущих частях при $U_{\text{п.п}} = \text{const}$ пропорциональны частоте [без учета зависимости $r_\Sigma(\omega)$] и обратно пропорциональны длительности фронта. Как отмечено в § 4-3, применение формул (4-55), (4-56) для расчета действующего значения тока допустимо только при $t_{\text{ф}} > t'_{\text{ф}} = \max\left\{\dfrac{2L_{\text{э}}}{r_\Sigma},\ r_\Sigma C_0\right\}$. Для малых длительностей фронтов действующее значение тока через конденсатор ограничивается сопротивлением r_Σ и индуктивностью $L_{\text{э}}$. Вычисление потерь в металлических частях конструкции конденсатора в случае малых длительностей фронтов необходимо производить, определяя точное выражение мгновенного тока через конденсатор. Это сравнительно просто можно выполнить, осуществив расчет электромагнитных процессов в цепи, содержащей конденсатор, с учетом r_Σ и $L_{\text{э}}$. Потери энергии в металлических частях конструкции конденсатора тогда равны $\int_0^T i^2(t)\, r_\Sigma\, dt$.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ВЫБОР КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ РАБОТЫ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ

5-1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОГО РАБОЧЕГО НАПРЯЖЕНИЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНОЙ ФОРМЫ

В большинстве практических случаев, кроме условий охлаждения, заданной является форма (или относительный спектр) воздействующего на конденсатор напряжения, а определить необходимо допустимую амплитуду несинусоидального напряжения и (или) амплитуду его переменной составляющей. Иногда при заданных форме и амплитуде требуется найти допустимую частоту повторения или длительность фронтов (в случае типовых форм напряжения, см. § 4-4). Возможны также случаи, когда необходимо определить допустимую продолжительность работы или коэффициент повторности включения при кратковременном или повторно-кратковременном режиме работы. Так как несинусоидальное напряжение характеризуется большим числом параметров, чем синусоидальное, то численное значение параметра режима работы, подлежащего определению, может быть найдено только при известных остальных параметрах.

При несинусоидальном напряжении в конденсаторах протекают те же физико-химические процессы, что и при синусоидальном напряжении [1].

Общие закономерности зависимости синусоидального напряжения от его частоты, описанные в § 3-3, сохраняются также и для несинусоидального напряжения, однако вследствие более интенсивного тепловыделения зона *III* на рис. 3-11 становится более протяженной.

При некоторых формах напряжения, например при трапецеидальной, при наличии значительных пиков напряжения (это имеет место на демпфирующих конденсаторах) возможно усиление ионизационных процессов (увеличение мощности частичных разрядов), приводящее к сокращению сроков службы. Это обусловливает рас-

[1] Интенсивность физико-химических процессов при несинусоидальном напряжении в большинстве практических случаев большая, чем при синусоидальном напряжении тех же амплитуды и частоты.

ширение зоны *II* (см. рис. 3-11). На демпфирующих и некоторых коммутирующих конденсаторах воздействующее напряжение содержит значительную постоянную составляющую, что приводит к существенному ускорению электрохимического старения и соответственно деформации зависимости $U(f)$ во всех зонах. В силу указанных причин как граничные частоты, разделяющие зоны преобладающего действия различных факторов, так и абсолютные значения допустимых напряжений по сравнению со случаем синусоидального напряжения претерпевают существенные изменения: граничные частоты сдвигаются в область более низкочастотного диапазона, а допустимые напряжения для большинства форм напряжений снижаются (особенно в зоне *III*). Естественно, что эти изменения зависят от спектра напряжения — чем более развиты его высокочастотные составляющие, тем они больше.

Полагая, что старение конденсаторов (и соответственно их срок службы, ресурс) определяется в основном температурой внутри конденсатора и мощностью частичных разрядов независимо от формы воздействующего напряжения, и используя упрощенные модели старения (см. § 2-4), можно найти допустимое напряжение по этим ограничивающим факторам. С этой целью, используя соотношения (2-25) и (2-26), определяем допустимую для заданного срока службы и температуры охлаждающей среды мощность тепловыделения, а затем, применяя формулы § 4-3 и 4-4, находим допустимые параметры несинусоидального напряжения (полный размах $U_{\text{п.п}}$, частоту повторения, длительность фронта и т. д.).

При несинусоидальном напряжении, особенно при импульсном характере тока через конденсатор, чрезвычайно важным является учет зависимости максимального теплового сопротивления конденсаторов от относительной доли потерь в металлических частях конструкции конденсатора (см. табл. 2-1). Так как при сложной форме воздействующего напряжения мощность потерь находится численными методами (см. § 4-2), то определение допустимого напряжения непосредственно осуществить нельзя, поэтому для заданной формы рассчитывается мощность при произвольном полном размахе напряжения $U'_{\text{п.п}}$. Затем допустимое напряжение находится по следующей формуле [5-1]:

$$U_{\text{п.п}} = U'_{\text{п.п}} \sqrt{P''/P'}, \qquad (5\text{-}1)$$

где P'' — мощность тепловыделения, найденная из совместного решения (2-25) и (2-26).

Определение допустимого напряжения на коммутирующих конденсаторах ТП при номинальном сроке службы и условиях охлаждения рассмотрено и в [4-20].

В тех случаях, когда известен спектр воздействующего напряжения, например, для фильтровых конденсаторов, допустимое рабочее напряжение (действующее значение напряжения 1-й гармоники) можно найти, определив предварительно мощность потерь при каком-либо напряжении U'_1 и применив (5-1):

$$P' = (U'_1)^2 \Omega C \sum_{k=1}^{n} \frac{U^2_k}{U^2_1} \operatorname{tg} \delta_k,$$

где U_1 — действующее значение напряжения 1-й гармоники; U_k / U_1 — относительный спектр.

Определение других допустимых параметров несинусоидального напряжения представляет более громоздкую задачу; так, в ряде случаев необходимо решать трансцедентные уравнения (см. табл. 4-3) либо использовать метод последовательных приближений.

При работе в ТП коммутирующих и демпфирующих конденсаторов через них протекают импульсные токи значительной амплитуды и малой продолжительности (десятки и сотни микросекунд). В результате тепловыделения возможны локальные превышения температуры конструкции — крышки в районе проходных изоляторов, вводов, контактных узлов, тогда как полная мощность тепловыделения в конденсаторе не превысит допустимое значение. Таким образом, кроме ограничения полной мощности тепловыделения, для предотвращения чрезмерных локальных превышений температуры конструкции конденсаторов, приводящих к быстрому выходу его из строя, необходимо ограничение тепловыделения в «слабых» местах конструкции конденсатора.

Большинство современных конструкций конденсаторов разрабатываются такими, чтобы локальные превышения температуры в таких элементах, как крышки, вводы, не возникали. Однако, поскольку при импульсном токе тепловыделение в активных сопротивлениях металлических частей конструкции имеет импульсный характер, при понижении частоты повторения возникают колебания температуры элементов конструкции конденса-

тора около среднего значения (см. § 3-3). Наиболее существенные колебания температуры имеют место у элементов, имеющих малую теплоемкость. Таким, например, является место непосредственного контакта металлизированных обкладок с контактными узлами. Неодинаковое сопротивление точек контактирования приводит к неравномерному распределению тока и тепловыделению в переходном сопротивлении. Определение импульсного тока из соображений допустимого превышения температуры этой области наталкивается на трудности, связанные с определением переходного сопротивления. В [П-4] применен метод экспериментальной оценки допустимого импульсного тока.

Согласно этой методике допустимая амплитуда тока, А, через конденсаторы с металлизированными обкладками определяется по следующей формуле:

$$I_{max} = \Gamma C / \sqrt{\tau_{и.э}}, \qquad (5\text{-}2)$$

где C — емкость конденсатора, мкФ; $\tau_{и.э}$ — энергетическая длительность импульса, это длительность прямоугольного импульса, имеющего ту же амплитуду и действующее значение, что и реальный импульс длительности $\tau_и$ [1], т. е. $\tau_{и.э} = \frac{1}{I^2_{max}} \int_0^{\tau_и} i^2(t)\,dt$; Γ — коэффициент, зависящий от типа и номинальной емкости конденсатора, $А^2 \cdot с^{1/2}/мкФ$, значения коэффициента Γ для некоторых типов конденсаторов приведены в табл. 5-1 [П-4].

Превышение амплитуды импульсного тока над значением, определяемым по (5-2), даже в течение непродолжительного времени может привести к полному внезапному отказу — потере емкости из-за выгорания обкладок в зоне контактного узла.

Зная аналитическую связь между амплитудой импульсного тока и параметрами несинусоидального на-

---

[1] При прямоугольной форме импульса тока $\tau_{и.э} = \tau_и$; для импульса, имеющего форму полуволны синусоиды, $\tau_{и.э} = \tau_и/2$; для импульса экспоненциальной формы $\tau_{и.э} = \tau/2$, где τ — постоянная времени экспоненты.

Таблица 5-1

Тип конденсатора	Напряжение, В	Емкость $C_н$, мкФ	Коэффициент Г, $А \cdot с^{1/2}/мкФ$
МБГЧ*	250	2,0; 1,0	0,09
		4,0; 10,0	0,018
	500	0,5; 1,0	0,1
		2,0; 4,0	0,045
	750	0,25; 0,75	0,06
		1,0; 2,0	0,045
	1000	0,25	0,1
		0,5; 1,0	0,06
К75-10	250	0,1—0,33	0,107
		0,47—2,2	0,066
		3,3—10,0	0,030
	500	0,1—0,68	0,107
		1,0; 1,5	0,066
		2,2; 3,3	0,030
	750	0,1—0,33	0,170
		0,47—1,0	0,107
		1,5	0,050
	1000	0,1—0,47	0,0170
		0,68; 1,0	0,107
К73П-2	400	0,047—0,33	0,017
		0,47; 0,68	0,01**
		0,5; 1,0	0,02
		2,0—15,0	0,014***
	630	0,033—0,1	0,03
		0,15—0,47	0,02**
		0,25; 0,50	0,04
		1,0—10,0	0,026***
	1000	0,068—0,33	0,038
		0,5—6,0	0,044
		8,0; 10,0	0,020
К71-4	160	1,2; 1,5	0,086
		1,8—4,7	0,060
		5,6—10,0	0,047
	250	0,027—0,18	0,14
		0,22—1,0	0,086

* Коэффициент Г для конденсаторов МБГЧ получен по результатам длительных испытаний при трапецеидальной форме напряжения ($t_ф$=100÷300 мкс).

** Корпус цилиндрический.

*** Корпус прямоугольный.

пряжения, можно определить допустимый полный размах переменной составляющей напряжения [1].

Допустимое напряжение несинусоидальной формы определяется также мощностью частичных разрядов. Для непропитанных конденсаторов или конденсаторов с вязкой пропиткой, у которых недопустимы частичные разряды, полный размах переменной составляющей несинусоидального напряжения не должен превышать двойной амплитуды номинального синусоидального напряжения. У конденсаторов с жидкой пропиткой допустимое напряжение по этому ограничивающему фактору можно найти, используя допущение неизменности суммарной или полной энергии частичных разрядов за срок службы при различных условиях эксплуатации ($P_{\text{ч.р}}\tau=$ $=\text{const}$) и применяя эквивалентирование мощности частичных разрядов при несинусоидальном напряжении (см. § 2-2). При эквивалентировании необходимо учитывать, что при наличии в кривой напряжения глубоких провалов (обычно они могут быть на демпфирующих и коммутирующих конденсаторах) повышается эквивалентная частота вследствие увеличения числа «пачек» вспышек ионизации на периоде повторения (см. § 2-2).

Учитывая сказанное, можно найти допустимый полный размах напряженности поля в диэлектрике (или напряжения на конденсаторе) несинусоидальной формы. В частности, для трапецеидального напряжения с фронтами косинусоидальной формы одинаковой продолжительности, усредняя мощность частичных разрядов [2], получаем:

$$U_{\text{п.п}} = 2\sqrt{2}\,U_1 \sqrt[c]{\frac{f_1^{n}\tau_1}{f_{\text{п}}\tau_2\,(2t_{\text{ф}})^{1-n}}}, \qquad (5\text{-}3)$$

где U_1, f_1, τ_1 — соответственно действующее значение напряжения синусоидальной формы, его частота и срок службы конденсатора при этих параметрах воздействующего напряжения; $f_{\text{п}}$ — частота повторения несинусоидального напряжения; τ_2 — требуемый срок службы (или ресурс); c, n — показатель степени [см. (2-19)].

---

[1] При напряжении трапецеидальной формы (см. рис. 1-4) с линейными и косинусоидальными фронтами амплитуда тока соответственно равна $U_{\text{п п}}C/t_{\text{ф}}$ и $\pi U_{\text{п п}}C/t_{\text{ф}}$. Тогда допустимое значение $U_{\text{п.п}}$ по (5-2) равно для линейного фронта $10^6 \cdot \Gamma\sqrt{t_{\text{ф}}}$ и для косинусоидального $9 \cdot 10^5 \Gamma\sqrt{t_{\text{ф}}}$.

[2] Предполагается, что на участках кривой напряжения, где $du/dt=0$, частичные разряды отсутствуют.

С понижением частоты повторения ионизационное старение ослабляется и основную роль начинают играть электрохимические процессы, особенно при наличии постоянной составляющей [П-1]. В технических условиях на конденсаторы обычно оговаривается допустимое значение постоянной составляющей и амплитуда переменной синусоидальной составляющей, а для некоторых типов конденсаторов и несинусоидальной (импульсного вида) — формы.

На низких частотах у непропитанных конденсаторов и у пропитанных вязкой пропиткой амплитуду переменной составляющей рекомендуется сохранять во всем диапазоне вплоть до нулевой частоты неизменной, равной амплитуде номинального напряжения.

У конденсаторов с пропиткой хлорированными дефинилами без стабилизаторов, связывающих водород и хлор, выделяющийся под действием напряжения, наличие постоянной составляющей приводит к резкому сокращению срока службы, поэтому применение таких конденсаторов при наличии постоянной составляющей или на инфранизких частотах недопустимо.

При небольших требуемых сроках службы или ресурсах в форсированных режимах работы основными факторами, ограничивающими допустимое напряжение, являются: электрическая прочность диэлектрика, локальные превышения температуры диэлектрика и переходного контактного сопротивления, а также тепловая стабильность конденсатора.

Определение допустимого напряжения по условию обеспечения тепловой стабильности можно осуществить следующим образом. Для напряжения с известным спектром (или формой) находится критическая мощность тепловыделения при несинусоидальном напряжении по методике, изложенной в § 2-3. Зная критическую мощность тепловыделения, можно найти допустимый полный размах несинусоидального напряжения типовой формы или допустимый спектр напряжения в общем случае так, как это описано выше. При этом необходимо ввести коэффициент запаса, который учитывал бы начальный разброс и дрейф параметров конденсаторов во времени.

При определении допустимых кратковременных пиковых значений напряжений можно ориентироваться на амплитуду синусоидального испытательного напряжения, приводимую обычно в технических условиях на конден-

саторы. В длительных режимах работы допустимая амплитуда несинусоидального напряжения не должна превышать некоторого допустимого значения, обычно указываемого в справочных материалах как сумма постоянной и амплитуды переменной составляющих [1-52].

В каталогах на конденсаторы фирмы «Сименс», например приводятся данные о допустимых спорадических перенапряжениях и периодических (в длительных режимах) пиковых значениях напряжений.

Повторно-кратковременные режимы работы и связанное с ними циклическое тепловыделение порождают те же особенности определения допустимых параметров напряжения, что и при синусоидальном напряжении (см. § 3-3).

Поскольку по заданным условиям эксплуатации трудно сразу определить, какой ограничивающий фактор является главным, т. е. по которому получается минимальное значение допустимого напряжения, необходим расчет допустимого напряжения с учетом всех указанных ограничивающих факторов.

Пример. Необходимо определить допустимое напряжение на конденсаторе МБГЧ-750-2,0 при T_0=70°С, τ=5000 ч при симметричной трапецеидальной форме напряжения с линейными фронтами (см. рис. 1-4,*в*). Частота повторения $f_п$=400 Гц, длительность фронтов $t_{ф1}=t_{ф2}=100\cdot10^{-6}$ с. Режим работы длительный, простой.

1. Определяем допустимую мощность тепловыделения, используя (2-25):

$$P=(T_{max}-T_0)/R_{max}=(90-70)/6{,}9=3{,}1 \text{ Вт},$$

где значение R_{max} взято из табл. 2-1.

Тангенс угла потерь конденсатора МБГЧ-750-2,0 на средней частоте $f_{ср}=\sqrt{1/(2{,}5\cdot10^{-3}\cdot100\cdot10^{-6})}=2000$ Гц (см. табл. 4-3) при средней температуре в конденсаторе $T_{ср}=70+P\cdot R_{ср}=70+3{,}1\cdot5{,}4=86$°С составляет около 10^{-2}. Тогда допустимый полный размах напряжения с учетом формулы табл. 4-3 для трапецеидального напряжения с косинусоидальными фронтами равен:

$$U_{п.п1}=\sqrt{\frac{P}{1{,}5f_пC\operatorname{tg}\delta_{ср}\lg\frac{1{,}4T_п}{t_ф}}}=$$

$$=\sqrt{\frac{3{,}1}{1{,}5\cdot400\cdot2\cdot10^{-6}\cdot10^{-2}\lg\frac{1{,}4\cdot2{,}5\cdot10^{-3}}{100\cdot10^{-6}}}}=416 \text{ В}.$$

2. Найдем допустимый полный размах напряжения из условия ограничения амплитуды импульсного тока, использовав (5-2) и данные табл. 5-1:

$$U_{п.п2}=\Gamma\sqrt{t_ф}\cdot10^6=0{,}045\sqrt{100\cdot10^{-6}}\cdot10^6=450 \text{ В}.$$

3. Исходя из условия ограничения действующего значения тока через конденсатор (5-4), с учетом (4-56) находим допустимое значение $U_{\text{п.пз}}$

$$U_{\text{п.пз}} = \frac{I}{\sqrt{2}C}\sqrt{\frac{t_{\text{ф}}}{f_{\text{п}}}} = \frac{2{,}8}{\sqrt{2}\cdot 2\cdot 10^{-6}} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{100\cdot 10^{-6}}{400}} = 500 \text{ В},$$

где I=2,8 А согласно [5-7].

4. Для предотвращения ионизационного старения согласно (5-6) $U_{\text{п.п4}}$ равно:

$$U_{\text{п.п4}} = 2\sqrt{2}\cdot 750 \sqrt[7]{\frac{50^{0{,}7}\cdot 5000}{400\cdot 5000\,(2\cdot 100\cdot 10^{-6})^{1-0{,}7}}} \approx 1860 \text{ В}.$$

Таким образом, окончательно допустимый полный размах напряжения равен минимальному из полученных значений $U_{\text{п.п}}$= =416 В.

Представление графической информации о допустимом напряжении несинусоидальной формы сопряжено с большим ее объемом из-за разнообразия форм, тем более что необходимо учесть возможные на практике отличия в условиях охлаждения, требуемых сроков службы и различные номинальные емкости конденсаторов. Поэтому такая графическая информация приводится для одной из типовых форм напряжения, обычно — трапецеидальной, при максимальной по ТУ температуре охлаждающей среды, для номинального срока службы.

В качестве примера на рис. 5-1,*а* приведены зависимости допустимого полного размаха напряжения $U_{\text{п.п}}$ для конденсаторов типа К75-10-500-3,3 при T_0=70°С и τ=5000 ч, при симметричной трапецеидальной форме напряжения с косинусоидальными фронтами (см. рис. 1-4,*а*), а на рис. 5-1,*б* — при напряжении гребенчатой формы (см. рис. 1-4,*г*) с косинусоидальными фронтами.

Так как при изменении параметров несинусоидального напряжения его допустимое значение определяет тот или иной фактор, для типовых форм напряжения можно построить границы областей, в пределах которых определяющим допустимое напряжение является один из упомянутых выше факторов [5-3]. Эти границы представляют собой сочетания параметров формы ($f_{\text{п}}$, $t_{\text{ф}}$) в точках пересечения зависимостей допустимого напряжения,

определяемых различными факторами при одинаковых значениях $t_ф$.

На рис. 5-2,*а* приведены границы областей для конденсаторов типа МБГЧ, на рис. 5-2,*б* — для конденсаторов типа К75-10 при симметричной трапецеидальной форме напряжения с косинусоидальными фронтами при T_0=70°С, τ=5000 ч. В области, отмеченной на рис. 5-2,*а*, *б* цифрой *I*, фактором, определяющим допустимое рабо-

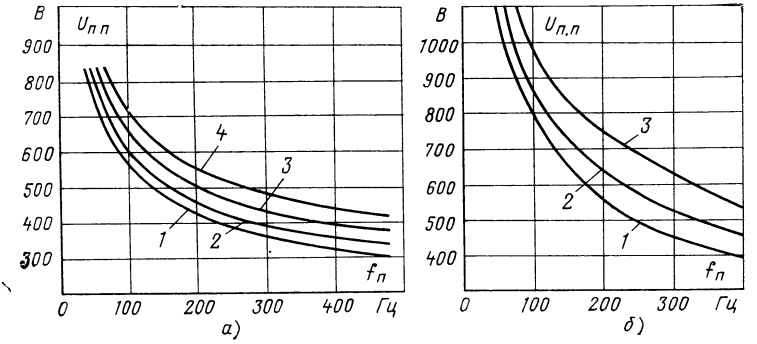


Рис. 5-1. Зависимости от частоты допустимого полного размаха напряжения симметричной трапецеидальной (*а*) и гребенчатой (*б*) форм с косинусоидальными фронтами для конденсаторов типа К75-10-500-3,3.

1 — $t_ф$=50 мкс; *2* — 100 мкс; *3* — $t_ф$=200 мкс; *4* — $t_ф$=400 мкс.

чее напряжение, является тепловыделение в конденсаторах, в области *II* — локальный нагрев обкладок вблизи контактных узлов, в области *III* — электрическая прочность диэлектрика.

Из приведенных на рис. 5-2,*а*, *б* данных видно, что основными факторами, определяющими допустимое рабочее напряжение конденсаторов с полярным диэлектриком в большей части области сочетания параметров формы, являются тепловыделение и определяемая им максимальная температура внутри конденсатора.

Очевидно, что для конденсаторов других типов, а также при других формах напряжений или при других значениях T_0 и τ границы областей изменят свое положение. Так, при понижении температуры охлаждающей среды область *II* расширяется в область больших частот повторения. У конденсаторов с неполярным диэлектриком границы области *II* сдвигаются в область повышенных

частот (рис. 5-2,*а*, *б*), а для конденсаторов с фольговыми обкладками область *II* перемещается в область инфранизких частот повторения и очень малых длительностей $t_ф$.

На практике часто бывает необходимым определить допустимое рабочее напряжение несинусоидальной формы у конденсаторов, разработанных для синусоидально-

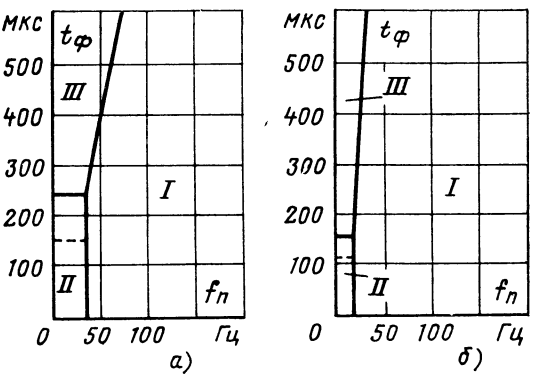


Рис. 5-2. Области действия основных факторов, ограничивающих допустимую амплитуду напряжения симметричной трапецеидальной формы с косинусоидальными фронтами на конденсаторах типов МБГЧ (*а*) и К75-10 (*б*).
——— — C=10 мкФ; U=250 В; — — — — C=1 мкФ, U=1000 В.

го напряжения или несинусоидального напряжения другой формы. Если неизвестна конструкция конденсатора, то приближенно (обычно с запасом в сторону занижения) допустимое напряжение можно найти из следующих условий:

$$\left.\begin{aligned} &P_2 \leqslant P_1; \\ &I_2 \leqslant I_1; \\ &U_{2п.п} \leqslant U_{1п\,п} \text{ и } U_{п2} \leqslant U_{п1}, \end{aligned}\right\} \qquad (5\text{-}4)$$

где P_2, I_2, $U_{2п.п}$, $U_{п2}$ — средняя мощность потерь, действующее значение тока, полный размах напряжения и его пиковое значение при несинусоидальной форме; P_1, I_1, $U_{1п.п}$, $U_{п2}$ — те же параметры при напряжении синусоидальной формы.

Последнее в (5-4) соотношение обеспечивает в расчетном режиме такой же запас по электрической прочности, что и в номинальном режиме.

В том случае, когда для конденсатора известны зависимости допустимого синусоидального напряжения от частоты, для лучшего его использования необходимо найти максимально допустимые значения P_1 и I_1. Если такие зависимости неизвестны, то можно рассчитать эти значения для номинального режима, однако при этом может возникнуть определенный запас по напряжению.

Аналогичным образом можно поступить и в случае, когда необходимо рассчитать допустимое напряжение одной формы, если известно напряжение другой формы, например в случае, если конденсатор разработан для какого-либо конкретного электрического режима (конденсаторы типов ГСТ, РСТ, РСТО, К75-31 и др.).

Особенности определения допустимого рабочего напряжения несинусоидальной формы при сложном длительном, повторно-кратковременном простом и сложном режимах работы практически те же, что и в случае синусоидального напряжения (см. § 3-3). В этих режимах необходимо учитывать, что при интервалах нагрузки, существенно меньших тепловой постоянной, нагрев теплового центра определяется средней мощностью потерь.

В противном случае допустимая мощность тепловыделения и соответственно напряжение находятся из расчета динамики температуры внутри конденсатора (см. § 2-3). При этом ограничение максимальной температуры допустимым значением для заданного срока службы с некоторым запасом обеспечивает надежную работу конденсатора. Если имеется запас по электрической прочности, то для лучшего использования конденсаторов в таких режимах можно допускать превышение температуры, максимально допустимой для длительного простого режима. Однако при этом не должна превышаться предельная для данного диэлектрика температура.

В режимах работы с изменяющейся нагрузкой или температурой охлаждающей среды необходимо эквивалентирование воздействующих нагрузок или решение интегрального уравнения (2-65), в котором можно также учесть дрейф параметров конденсаторов во времени. Принципиальный подход к этим задачам такой же, как в случае синусоидального напряжения (см. § 2-4, 3-3).

5-2. УДЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОНДЕНСАТОРОВ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ

Удельные параметры конденсаторов различных типов при несинусоидальном воздействующем напряжении необходимы для сопоставления их объемов, массы, а также стоимости при выборе оптимального типа, определения областей рационального применения конденсаторов различных типов в различных условиях эксплуатации.

Поскольку несинусоидальное напряжение, воздействующее на конденсаторы, имеет очень разнообразные формы, то удельные параметры конденсаторов удается получить только для напряжений типовых форм. При этих формах напряжения режим работы конденсатора имеет импульсный характер, для которого общепринятым удельным параметром является удельная энергия заряда конденсатора, т. е. энергия, отнесенная к объему, Дж/м^3, или к массе, Дж/кг, конденсатора:

$$w_V = CU^2_{max}/2V; \quad w_M = CU^2_{max}/2M, \tag{5-5}$$

где C — емкость конденсатора, Ф; U_{max} — амплитуда допустимого рабочего напряжения, В; V, M — объем и масса конденсатора, м^3, кг.

Очевидно, что из-за зависимости рабочего напряжения от параметров формы воздействующего напряжения и условий эксплуатации (режима охлаждения, срока службы и т. д.) удельная энергия конденсаторов непостоянна и каждому сочетанию параметров формы и других условий эксплуатации соответствуют различные значения удельной энергии[1].

Таким образом, для сопоставления конденсаторов необходимо определять удельные параметры для одних и тех же условий (электрического режима, срока службы, условий охлаждения и т. д.).

На рис. 5-3 в качестве примера показаны частотные зависимости удельной энергии конденсаторов МБГЧ, К75-10, К71-4 при напряжении симметричной трапецеидальной формы с $U_0=0$, $t_ф=2\cdot10^{-4}$ с при $T_0=70$°С и $\tau=5000$ ч. Участки кривых с постоянным значением удельной энергии образуются при постоянном допустимом рабочем напряжении (в рассмотренных на рис. 5-3

[1] Разумеется, что различные сочетания условий эксплуатации могут обусловливать также одинаковые значения удельной энергии, если при этом совпадают допустимые напряжения.

случаях оно ограничено электрической прочностью диэлектрика).

Удельным параметром, которым можно пользоваться для сопоставления конденсаторов при типовых формах воздействующего напряжения, является также удельный заряд, т. е. заряд, отнесенный к объему, Кл/дм³, или массе, Кл/кг:

$$q_V = CU_{max}/V;\ q_M = CU_{max}/M. \qquad (5\text{-}6)$$

При одном и том же напряжении можно использовать другой параметр конденсаторов — удельную емкость (см. § 3-4).

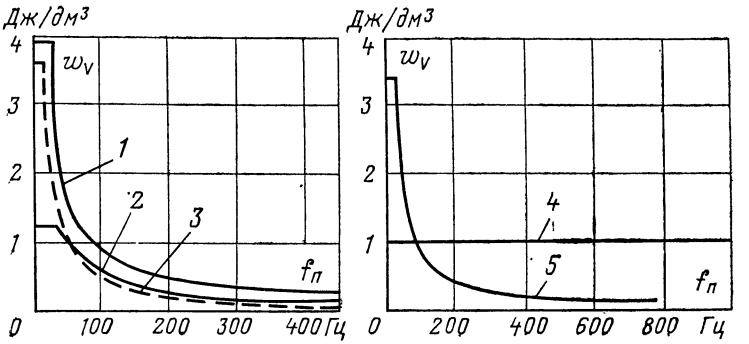


Рис. 5-3. Частотные зависимости удельной энергии конденсаторов при симметричном трапецеидальном напряжении с косинусоидальными фронтами ($t_ф = 200 \cdot 10^{-6}$ с).

1 — К75-10-500-3,3; *2* — К42-15-630-4,0; *3* — МБГЧ500-4,0; *4* — К71-4-160-10,0; *5* — К75-10-250-10,0.

В табл. П-1, П-2 приведены значения удельных параметров конденсаторов для ТП на синусоидальном напряжении. В общем случае можно считать, что чем выше значения удельных параметров конденсаторов при синусоидальном напряжении, тем они лучше и при несинусоидальном воздействующем напряжении.

Однако в частных случаях это может иногда не соблюдаться. Так, конденсаторы К42-15, имеющие более низкие удельные параметры на синусоидальном напряжении, чем МБГЧ и К75-10, при гребенчатой форме напряжения (см. рис. 1-4,*в*) обеспечивают более высокие значения удельной энергии. В связи с этим определенное практическое значение имеет выяснение эксплуатацион-

ных режимов, в которых тот или иной тип конденсаторов имеет наилучшие удельные параметры [5-5, 5-6]. Так же, как и в случае синусоидального напряжения, при трапецеидальных и других типовых формах напряжения конденсаторы с полярным диэлектриком имеют более высокие удельные параметры при низких частотах повторения (примерно до 50—100 Гц), тогда как на более высоких частотах лучшие удельные параметры имеют конденсаторы с неполярным диэлектриком (см. рис. 5-3,*б*).

На рис. 5-4 показаны приблизительные границы областей оптимального применения конденсаторов различ-

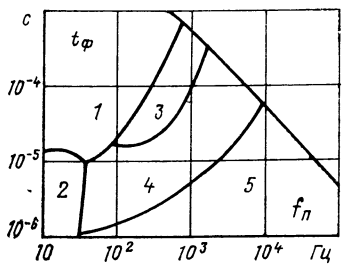


Рис. 5-4. Области рационального применения конденсаторов при напряжении симметричной трапецеидальной формы с косинусоидальными фронтами.

1 — К75-10; *2* — К42-15; *3* — К75-31; К77-5; *4* — К71-4; *5* — К72-11.

ных типов при напряжении симметричной трапецеидальной формы с косинусоидальными фронтами при $T_0 = 70°C$ и $\tau = 10\,000$ ч.

При сложных формах воздействующего напряжения, например при применении конденсаторов в качестве демпфирующих или фильтровых, удельные параметры, рассмотренные выше, не являются показательными.

При таких формах напряжения сопоставление конденсаторов по массо-габаритным показателям целесообразно производить по их установленной мощности (см. § 3-5), которая рассчитывается после выбора номинальной емкости конденсатора.

Рассчитывая установленную мощность конденсаторной батареи и зная удельную реактивную мощность конденсаторов (табл. П-1 и П-2), из соотношений, приведенных в § 3-5, находим массу и габариты батареи. При определении габаритов батареи так же, как и при синусоидальном напряжении, следует учитывать зазоры между конденсаторами.

5-3. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА КОНДЕНСАТОРОВ

Основная цель выбора конденсаторов при несинусоидальной форме воздействующего напряжения та же, что и в случае синусоидального напряжения, — определение типа, номинальной емкости и номинального напряжения конденсатора, которые, с одной стороны, обеспечат требуемые показатели надежности, т. е. необходимую долговечность и безотказность, а с другой — минимальную массу или габариты конденсаторной батареи.

При выборе типа конденсаторов необходимо, чтобы допустимые для него воздействия окружающей среды (давление, вибрации, влажность и т. д.) были не ниже, чем те, которые задаются для всего ТП[1].

Поскольку электрический режим работы конденсаторной батареи является заданным, т. е. известны форма, напряжение, продолжительность его воздействия, то разработчик ТП может обеспечить необходимую долговечность конденсаторов путем подбора их типа, номинальной емкости и способа охлаждения. Температура охлаждающей среды при этом считается также заданной.

Задача выбора оптимального типа и номинальной емкости конденсатора при несинусоидальной форме напряжения существенно более сложная, чем при синусоидальном напряжении, поскольку в данном случае, кроме долговечности, условий охлаждения и основной частоты повторения, необходимо учитывать также влияние параметров формы воздействующего напряжения на его допустимое значение. В частности, эти трудности обусловлены более сложными зависимостями мощности тепловыделения и мощности частичных разрядов от формы воздействующего напряжения (см. § 2-2, 4-2, 4-4).

Из-за большого разнообразия форм напряжений, воздействующих на конденсаторы ТП, обеспечить выбор конденсаторов по графическим зависимостям допустимого рабочего напряжения от параметров его формы удается только для некоторых типовых форм напряжения. Обычно таким напряжением является напряжение симметричной трапецеидальной формы с косинусоидальными фронтами.

---

[1] В некоторых случаях вибрация конденсаторов может быть снижена установкой их на амортизирующие прокладки.

Так же как и при синусоидальном напряжении, на основе информации, о которой шла речь в начале параграфа, а также в зависимости от функционального назначения конденсатора, частоты повторения, формы и значения воздействующего напряжения, необходимой емкости отбираются типы конденсаторов — «кандидатов» на применение в заданных условиях. Так, в качестве демпфирующих конденсаторов ТП обычно применяют МБГЧ при частоте повторения ниже 50 Гц или К75-10 при более высоких частотах. Правильному выбору конденсаторов также способствует представление об их основных свойствах и характеристиках.

Задача выбора оптимального типа и номинальной емкости конденсатора, таким образом, состоит из двух этапов. На первом этапе определяется оптимальная номинальная емкость конденсатора каждого из предварительно отобранных типов. На втором этапе определяются удельные или массо-габаритные параметры конденсаторных батарей, составленных из этих типов, и окончательно определяется оптимальный вариант, т. е. тип и номинальная емкость конденсаторов и схема их соединений в батарее.

Наиболее сложным является первый этап, поскольку по заданным условиям эксплуатации трудно сразу определить фактор, обусловливающий выбор конденсатора с наибольшим номинальным напряжением. Так как допустимое рабочее напряжение определяется с учетом следующих факторов (см. § 5-1): допустимой полной мощности тепловыделения; допустимой мощности частичных разрядов; допустимого действующего значения тока; допустимой амплитуды импульсного тока: допустимой амплитуды и среднего значения воздействующего напряжения, то и определение оптимальной номинальной емкости конденсатора необходимо производить, учитывая эти же факторы.

Условие правильного выбора номинального конденсатора в соответствии с j-м ограничивающим фактором можно записать в виде

$$U'_j \leqslant U''_j, \tag{5-7}$$

где U'_j — заданное значение несинусоидального напряжения (амплитуда, полный размах, действующее значение основной гармоники и т. д.); U''_j — допустимое значение напряжения заданной формы при данных усло-

виях охлаждения и сроке службы, зависящее от типа и номинальной емкости конденсатора.

Таким образом, оптимальным будет тот конденсатор, для которого с минимальным запасом выполняется условие (5-7) по всем ограничивающим факторам.

Определив допустимое напряжение для всех конденсаторов по всем факторам, можно найти оптимальный для заданных условий эксплуатации конденсатор. Однако такой подход (полный перебор вариантов) приемлем только при небольшом числе вариантов либо при машинном методе проектирования ТП. Так как большое число типов конденсаторов имеет всего одно-два значения номинальной емкости (табл. П-1 и П-2), то описанный выше подход при определении их применимости не вызывает больших затрат времени.

Для конденсаторов тех типов, которые имеют сравнительно большое число значений номинальной емкости, методику выбора оптимального варианта целесообразно построить таким образом, чтобы, с одной стороны, были учтены индивидуальные свойства и параметры конденсаторов, а с другой, чтобы погрешность выбора, обусловленная различными упрощениями, была бы минимальной.

Сложность создания такой методики состоит в том, что по таким ограничивающим факторам, как тепловыделение и амплитуда импульсного тока, допустимое значение напряжения зависит не только от номинального напряжения, но и номинальной емкости конденсатора (см. § 5-1).

Наиболее часто на практике применяется следующий упрощенный принцип выбора конденсатора. Полагается, что конденсатор обеспечит такие же показатели долговечности и безотказности при несинусоидальном режиме, если мощность тепловыделения в нем будет такая же, как в номинальном режиме, т. е. $P=P_{н}$. Из этого условия находится эквивалентное номинальное напряжение, а затем фактическое номинальное напряжение в соответствии с реальной шкалой номинальных напряжений.

Очевидно, что такой подход, учитывающий только один из нескольких ограничивающих факторов, может привести к неправильному выбору конденсатора. Кроме этого, он не учитывает различие в условиях охлаждения и в показателях долговечности в номинальном и расчетном режимах.

Упрощенный подход к выбору конденсаторов, учитывающий все ограничивающие факторы, в котором, однако, характеристики конденсаторов различной номинальной емкости учитываются приближенно, приведен в [3-14, 5-5, 5-12].

Для малогабаритных конденсаторов выбор конденсаторов осуществляется с помощью графических зависимостей допустимого напряжения от частоты. Однако графики $U(f)$ приводятся, как правило, либо только для синусоидальной формы, либо для синусоидальной и одной из импульсных форм напряжения. При этом конденсаторы объединены обычно в две группы (по емкости), а длительность фронта является параметром.

Ниже излагается сравнительно точный подход к определению оптимальной емкости конденсатора при любой форме напряжения, основанный на принципах, описанных в начале данного параграфа.

Одним из основных факторов, определяющих выбор номинальной емкости конденсатора, как установлено выше (см. § 5-1), являются тепловыделение и обусловленная им максимальная температура внутри конденсатора.

Максимальная температура внутри конденсатора, от которой зависит срок службы конденсатора, определяется либо из условия обеспечения требуемой долговечности конденсатора (см. § 2-4, 3-4), либо из условия обеспечения его тепловой стабильности (см. § 2-3).

Зная допустимую максимальную температуру внутри конденсатора и потери в нем, из (2-25) находим произведение $\Theta_{max}=(PR_{max})_{max}$, т. е. максимальное превышение температуры, которое должен допускать оптимальный конденсатор. Конденсаторы, у которых в заданном режиме значение $\Theta=PR_{max}$ будет больше $(PR_{max})_{max}$, будут иметь ресурс меньше заданного, так как T_{max} у них будет выше допустимого значения.

Если же выбрать конденсаторы, у которых $\Theta=PR_{max}<\Theta_{max}$, то их ресурс будет больше требуемого, но одновременно возрастут массо-габаритные параметры конденсаторной батареи.

Таким образом, задача поиска оптимального конденсатора состоит в том, чтобы из имеющегося множества конденсаторов выбрать тот, у которого при заданных форме, частоте и воздействующем напряжении значение $\Theta_i=R_{max}P_i$ было бы равно или несколько меньше Θ_{max}.

Точный учет индивидуальных характеристик конденсаторов, в частности температурно-частотной зависимости $\operatorname{tg}\delta$, приводит, как указывалось выше, к полному перебору всех вариантов, поскольку и удельные тепловыделения в конденсаторах $P^*=P/C$, Вт/мкФ и удельное максимальное тепловое сопротивление $R^*_{max}=R_{max}/C$, °С/(Вт·мкФ) зависят от номинальной емкости и номинального напряжения. Поэтому упрощение определения оптимального конденсатора может быть достигнуто только за счет пренебрежения одной из этих зависимостей. Так, для конденсаторов с полярным диэлектриком можно допустить независимость удельного тепловыделения от номинальной емкости, поскольку значение их $\operatorname{tg}\delta$ в диапазоне частот до нескольких тысяч герц определяется в основном $\operatorname{tg}\delta$ диэлектрика, который полагается одинаковым для всех конденсаторов.

В этом случае, зная $R_{max}C_н$ для каждого конденсатора и вычисляя значение Θ_{max}/P^*, находим оптимальный конденсатор. Им будет тот, у которого с минимальным запасом обеспечивается выполнение условия

$$R_{max}C_н \leqslant \Theta_{max}/P^*, \qquad (5\text{-}8)$$

где P^* — мощность потерь в конденсаторе емкостью $C=1{,}0$ мкФ в заданном электрическом режиме работы (см. § 4-3, 4-4).

Если зависимостью удельного тепловыделения от номинальной емкости и напряжения пренебрегать нельзя (в случае конденсаторов с неполярным диэлектриком), то упрощение выбора оптимального конденсатора можно достигнуть с помощью изложенного выше приема, объединив предварительно конденсаторы с близким удельным тепловыделением в группы. Тогда выбор осуществляется применением формулы (5-8) к каждой из групп. Окончательно выбирается тот конденсатор, у которого запас в выполнении условия (5-8) минимальный.

Возможны случаи, когда ни для одного из конденсаторов (5-8) не выполняется. Это означает, что заданный режим недопустим для единичных конденсаторов этого типа. В этих случаях для снижения нагрузки на единичный конденсатор можно применить последовательное включение двух и более конденсаторов. Выбор оптимального единичного конденсатора при этом производится точно так, как описано выше, но при уменьшенном в n раз значении воздействующего напряжения, где

n — число последовательно соединенных конденсаторов[1].

В кратковременном режиме работы или в длительном режиме с сокращенным сроком службы номинальное напряжение и емкость конденсатора необходимо выбирать также по условию обеспечения его тепловой стабильности, для чего определяются удельная критическая мощность тепловыделения в конденсаторах при заданных условиях охлаждения и предельно допустимая удельная мощность тепловыделения ($P_{кр}k_з$, где коэффициент запаса $k_з<1$). Дальнейший выбор не отличается от изложенного выше.

Важным фактором, который необходимо учитывать при определении номинальной емкости конденсатора, является превышение температуры элементов его конструкции (см. § 5-1). В частности, у конденсаторов с металлизированными обкладками при импульсном характере тока номинальное напряжение и емкость, при которых амплитуда тока не превысит допустимое значение, находятся следующим образом. Согласно (5-2) допустимая амплитуда тока равна:

$$I_{max\,доп}=\Phi_1 C_н/\Phi_2, \qquad (5\text{-}9)$$

где $\Phi_1=\Gamma$ — дискретная функция конденсаторов[2] (см. табл. 5-1); $\Phi_2=\sqrt{\tau_{и.э}}$ — функция параметров формы импульсного тока.

Амплитуда импульсного тока в заданном режиме работы зависит от воздействующего напряжения и его формы, а также значения номинальной емкости конденсатора, его индуктивности и последовательного активного сопротивления. Условие обеспечения надежной работы конденсаторов с металлизированными обкладками при импульсном характере тока следующее:

$$I_{max}\leqslant\Phi_1 C_н/\Phi_2, \qquad (5\text{-}10)$$

где I_{max} — амплитуда тока в заданном режиме.

Оптимальный конденсатор по этому условию находится путем выполнения с минимальным запасом следующего соотношения, вытекающего из (5-10):

$$\Phi_1\geqslant\Phi_2 I'_{max}, \qquad (5\text{-}11)$$

---

[1] Здесь можно также учесть возможный разброс емкостей конденсаторов.

[2] Коэффициент Г в общем случае зависит также от теплового режима работы конденсатора, т. е. тепловыделения и условий охлаждения.

где I'_{max} — амплитуда импульсного тока в заданном режиме, приходящегося на 1,0 мкФ.

Здесь, так же как и в случае полного тепловыделения в конденсаторе, трудность учета индивидуальных параметров конденсаторов состоит в том, что I'_{max} зависит от номинальной емкости и напряжения из-за наличия индуктивности и активного сопротивления токоведущих частей конструкции конденсаторов, влияющих на форму тока.

Объединяя конденсаторы в группы с близкими параметрами схемы замещения, удается в определенной мере смягчить отмеченную сложность выбора. Следует отметить, что влияние индуктивности и активного сопротивления конденсаторов на амплитуду и длительность импульсного тока начинает проявляться при достаточно малых длительностях фронтов напряжения (порядка 10^{-5} с и менее при $C=1{,}0$ мкФ), т. е. в большинстве случаев применения конденсаторов в ТП им можно пренебречь, что облегчает процедуру выбора конденсатора, удовлетворяющего (5-10).

Недопустимо большие локальные превышения температуры могут быть обусловлены также превышением допустимого действующего значения тока. Для предотвращения этого в случае несинусоидального напряжения также необходимо выполнение (3-32).

Наконец, последними условиями, исходя из которых необходимо определять номинальное напряжение конденсатора, являются обеспечение определенного запаса по длительной и кратковременной электрической прочности.

Если в номинальном режиме эти ограничивающие требования при разработке конденсаторов послужили основанием для выбора конструкции диэлектрической системы (типа диэлектрика, толщины и числа его слоев, типа пропитки и т. д.), то их удовлетворение при определении необходимого номинального напряжения в условиях эксплуатации, отличных от номинальных, обеспечивается выполнением с минимальным запасом следующих соотношений:

$$\left.\begin{aligned} U_{\text{п}} &\leqslant U_{\text{п.доп}}; \\ U_{\text{п.п}} &\leqslant U_{\text{п.п доп}}; \\ U_{\text{о}} &\leqslant U_{\text{о доп}}. \end{aligned}\right\} \qquad (5\text{-}12)$$

В левой части приведенных выражений (5-12) записаны параметры для заданного воздействующего напряжения (т. е. его амплитуда, полный размах и постоянная составляющая), а в правой — допустимые значения.

Первое условие (5-12) применяется при определении допустимых кратковременных эпизодических пиков перенапряжений, если в правой его части находится допустимое пиковое напряжение, определяемое кратковременной электрической прочностью. Так как последняя падает со временем, это значение $U_{\text{п.доп}}$ должно выбираться для момента $t=\tau$, т. е. для времени, равного сроку службы (см. § 2-4). Если перенапряжения на конденсаторе в процессе эксплуатации незначительны, то в правой части этого соотношения находится допустимое пиковое напряжение, определяемое длительной электрической прочностью.

В правую часть второго выражения (5-12) подставляется допустимый полный размах несинусоидального напряжения, определяемый допустимой мощностью частичных разрядов (см. § 5-1), т. е. также определяемый длительной электрической прочностью.

Выполнение третьего соотношения (5-12) обеспечивает отсутствие ускоренного выхода конденсаторов из строя из-за электрохимического старения ($U_{0\text{доп}}$ — допустимое для данного типа конденсаторов постоянное напряжение).

Указанные значения допустимых напряжений, если они не приводятся в нормативно-технической документации, при известной конструкции конденсатора можно оценить (см. § 5-1), используя сведения о применяемых напряженностях поля в диэлектрике и модели его старения (см. § 2-4). Если конструкция конденсатора разработчику ТП не известна, то значение $U_{\text{п.п доп}}$ может быть принято равным значению полного размаха напряжения в номинальном режиме, а значение $U_{\text{п.доп}}$ — равным амплитуде напряжения в номинальном режиме.

Допустимое среднее значение напряжения в этом случае определить трудно, поскольку неизвестны ни тип диэлектрика, ни тип пропитки. Обычно в справочных материалах и технических условиях на конденсаторы упомянутые выше параметры допустимых напряжений приводятся для определенных условий эксплуатации.

Применяя модели старения (см. § 2-4), эти значения можно ориентировочно пересчитать для заданных условий. Здесь, так же как и в случае определения конденсатора по допустимому тепловыделению и амплитуде импульсного тока может потребоваться последовательное включение конденсаторов.

Поскольку выражения (5-12) ограничивают снизу необходимые номинальные напряжения и выбор требуемого конденсатора по этим условиям осуществляется сравнительно просто, то с целью сокращения процедуры выбора по остальным условиям ее целесообразно начинать с выполнения (5-12).

Другие ограничения в выборе номинального напряжения, емкости могут быть сформулированы с позиций требований унификации, технологичности производства ТП и т. д. Такие ограничения в определенной мере упрощают поиск оптимального конденсатора.

Из значений номинальных напряжений и емкостей, найденных по всем ограничивающим факторам, окончательно выбирается конденсатор с наибольшим номинальным напряжением и минимальной емкостью. Когда основным ограничивающим условием является одно из условий (5-12), номинальная емкость выбирается такой, чтобы она подходила для данных условий.

После определения оптимальных емкостей конденсаторов каждого из типов («кандидатов» на применение) определяется их установленная мощность (см. § 3-5, 5-1), производится расчет массо-габаритных характеристик конденсаторных батарей и осуществляется окончательный выбор оптимального варианта.

Как для правильного выбора конденсатора, так и для согласования его применения необходима полная информация об условиях его эксплуатации.

Информация должна включать в себя:

1) требуемую емкость конденсаторной батареи;

2) точность задания значения емкости (допустимый разброс);

3) кривую напряжения, воздействующего на батарею, с указанием всех необходимых параметров. Для фильтровых и компенсирующих конденсаторов целесообразно приводить спектр воздействующего напряжения;

4) минимальную и максимальную температуры охлаждающей среды и способ охлаждения;

5) характеристики электрического режима работы (зависимость электрической нагрузки конденсатора от времени в течение срока службы);

6) значения возможных перенапряжений, частоты их возникновения, формы и продолжительности;

7) необходимые показатели долговечности (ресурс, срок службы и т. д.);

8) сведения о воздействиях окружающей среды (климатические, механические и другие воздействия);

В некоторых случаях целесообразно приводить схему, в которой включены конденсаторы и описание электромагнитных процессов в ней.

В качестве примеров рассмотрим выбор демпфирующих и фильтровых конденсаторов ТП.

Пример. Необходимо выбрать демпфирующие конденсаторы параллельного автономного инвертора тока при следующих условиях эксплуатации. Форма воздействующего напряжения показана на рис. 1-9,*б*. Режим работы длительный сложный (угол запирания вентилей изменяется от 10 до 60°). Амплитуды напряжения на вентиле: $U^{+}_{max}=800$ В, $U^{-}_{max}=200$ В. Частота повторения $f_{п}=400$ Гц=const. Возможные перегрузки: по напряжению 250% и по частоте 200% кратковременно (0,5 с) 5 раз в год. Требуемое значение емкости $C=0{,}5$ мкФ и $\Delta C=\pm 20\%$. Температура охлаждающей среды $T_0=+65$°С. Конденсатор применяется по схеме рис. 1-7,*а* при $R=60$ Ом. Индуктивность монтажа $L_{м}=0{,}1\cdot 10^{-6}$ Гн.

Выбор конденсатора. Так как частота напряжения повышенная, в качестве кандидатов на применение выберем конденсаторы типа К75-10, обладающие повышенной стойкостью к импульсным токам и высокой надежностью. Для выбора конденсатора определим параметры, характеризующие электрический режим работы. Среднее значение напряжения на конденсаторе

$$U_0=\frac{1}{T_{п}}\int_0^{T_{п}} U(t)\,dt\approx 320 \text{ В}.$$

Амплитуда импульсного тока и его энергетическая длительность

$$I_{max}\approx 12 \text{ А}, \quad \tau_{и.э}\approx 9\cdot 10^{-6} \text{ с}.$$

Амплитуда напряжения при перегрузке

$$U^{+}_{max}=2{,}5\cdot 800=2000 \text{ В}.$$

Полный размах $U_{п.п}=2500$ В. Согласно (5-12) и [3-16] номинальное напряжение из условий кратковременной электрической прочности $4\sqrt{2}U'_{н}\geqslant U_{п.п}$ и $2\sqrt{2}U''_{н}\geqslant U^{+}_{max}$ должно быть $U'_{н}\geqslant 440$ В и $U''_{н}\geqslant 710$ В, а из условий длительной электрической прочности $2\sqrt{2}U'''_{н}\geqslant(|U^{+}_{max}+U^{-}_{max}|)=1000$ В и $\sqrt{2}U^{IV}_{н}\geqslant U^{+}_{max}-U'''_{н}\geqslant 350$ В и $U^{IV}_{н}\geqslant 570$ В.

Из полученных данных видно, что следует применить конденсаторы, имеющие $U_н \geqslant 710$ В. Так как для демпфирующих цепочек желательно применение одного конденсатора, то проверке применимости подлежат конденсаторы К75-10-750-0,47 и К75-1000-0,47.

Вначале определяем допустимость применения конденсатора К75-10-750-0,47. Из (5-2) находим допустимую амплитуду тока для этого конденсатора

$$I_{max\,доп} = 0,107 \cdot 0,47 / \sqrt{9 \cdot 10^{-6}} = 16,8 \text{ А}.$$

Так как $I_{max\,доп}=16,8$ А $> I_{max}=12$ А, то по этому условию конденсатор К75-10-750-0,47 применять допустимо.

Мощность потерь в конденсаторе К75-10-750-0,47 в заданном режиме, вычисленная на ЭВМ с помощью методики, изложенной в § 4-3 при $\alpha=60°$, составляет $P=1,97$ Вт. Максимальное тепловое сопротивление для этого конденсатора найдем приближенно как $R_{max} \approx 2R_н$, где

$$R_н = \frac{1}{\alpha S_0} = \frac{1}{1,35 \cdot 10^{-3} \cdot 110} = 6,7 \text{ (°С/Вт)}$$ (см. § 2-3), $R_{max}=13,4$ (°С/Вт).

Допустимая мощность тепловыделения в конденсаторе

$$P_{доп} = \frac{T_{max} - T_0}{R_{max}} = \frac{95 - 65}{13,4} = 2,24 \text{ Вт}.$$

Так как допустимая мощность тепловыделения больше фактической, то применение конденсатора К75-10-750-0,47 ±20% в данных условиях допустимо.

Пример. Необходимо выбрать конденсаторы для Г-образного выходного фильтра однофазного автономного инвертора напряжения при следующих условиях эксплуатации. На конденсатор воздействует в длительном простом режиме следующий спектр напряжения (действующее значение): $U_1=130$ В, $U_3=20$ В, $U_5=8$ В. Частота основной гармоники 10^3 Гц. Требуемая емкость фильтра $C=30,0$ мкФ, точность емкости ±5%. Возможны кратковременные эпизодические перенапряжения до 130%.

Выбор конденсатора. Так как частота напряжения достаточно высокая, то целесообразно применение конденсаторов с неполярным диэлектриком. Используя данные табл. П-2, выбираем в качестве «кандидатов» на применение два типа конденсаторов — К71-4 и К72-11. Поскольку конденсаторы К72-11 допускают номинальное напряжение синусоидальной формы на частотах ниже 5000 Гц, без расчетов выбираем для батареи конденсаторы К72-11-250-3,3 мкФ с объемом $V=0,52$ дм^3. Число конденсаторов в батарее

$$n = C/C_1 = 30/3,3 = 9 \text{ шт}.$$

Объем батареи $V_б = nV_1k_V = 9 \cdot 0,52 \cdot 1,35 = 6,3$ дм^3.

Масса батареи $MG_б = MG_1n = 1,370 \cdot 9 = 12,3$ кг.

Для выбора оптимального конденсатора типа К71-4 определим амплитуду напряжения на конденсаторе фильтра. Так как фазы гармоник не заданы, принимаем

$$U_{max} = \sum_{1}^{3} U_{max} = (130 + 20 + 8)\sqrt{2} = 224 \text{ В}.$$

Из условия (5-14) находим, что номинальное напряжение должно быть $U_н \geqslant 224$ В, т. е. необходимо либо последовательно соединять два конденсатора с напряжением $U_н=160$ В, либо применить конденсаторы с напряжением $U_н=250$ В. Так как в последнем случае запас по напряжению меньше, останавливаемся на варианте конденсатора с $U_н=250$ В. Для формирования батареи применим конденсатор К71-4-250-1,0. Мощность потерь в конденсаторе составит:

$$P=\sum_1^3 P_k=\sum_1^3 U^2_k k\Omega C \operatorname{tg}\delta_k=130^2\cdot 2\pi\cdot 10^3\cdot 10^{-6}\cdot 5\cdot 10^{-4}+$$

$$+20^2\cdot 2\pi\cdot 10^3\cdot 3\cdot 10^{-6}\cdot 5{,}4\cdot 10^{-4}+8^2\cdot 2\pi\cdot 10^3\cdot 5\cdot 10^{-6}\cdot 5{,}9\cdot 10^{-4}=$$

$$=0{,}063 \text{ Вт}.$$

Очевидно, что такая мощность тепловыделения вполне допустима для данного конденсатора.

Число параллельно включенных конденсаторов в батарее

$$n=C/C_1=30/1{,}0=30 \text{ шт}.$$

Объем батареи $V_б=nV_1k_V=30\cdot 0{,}017\cdot 1{,}35=0{,}69$ дм^3.

Масса батареи $M=nM_1=30\cdot 0{,}03=0{,}9$ кг.

Сопоставляя варианты по массе и объему батареи конденсаторов фильтра, окончательно останавливаемся на варианте батареи с конденсаторами К71-4.

5-4. ВЫБОР КОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ РАБОТЫ ПРИ НАПРЯЖЕНИИ ТИПОВОЙ ФОРМЫ

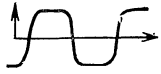
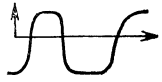
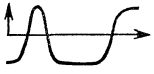
Общий подход к выбору конденсаторов при воздействующем напряжении, имеющем простые (типовые) формы, такой же, как изложенный в § 5-3. Однако для типовых форм удается получить достаточно простые выражения, позволяющие определить оптимальный конденсатор.

В табл. 5-2 приведены соотношения, согласно которым выбирается номинальное напряжение конденсаторов для различных типовых форм напряжения.

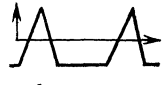
Правильный выбор конденсатора обеспечивается удовлетворением с минимальным запасом приведенных в табл. 5-2 условий. При $t_{ф1} \neq t_{ф2}$ проверка условия $\Gamma \geqslant \Phi(U_{п.п}, t_ф)$ производится для фронта минимальной длительности, условия $R_{max}C_н \leqslant \Phi(U_{п.п}, t_ф)$ — для фронта $t_ф$, определяемого (4-76) и $I/C_н \geqslant \Phi(U_{п.п}, f_п, t_ф)$ с учетом (4-55) и (4-56).

Кроме приведенных в табл. 5-2 выражений, с помощью которых определяется номинальная емкость

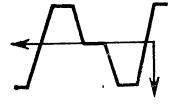
Таблица 5-2

Форма напряжения	Параметры	Соотношение для выбора конденсатора
	$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$; $t_{в1} = t_{в2}$	$R_{max}C_н \leqslant \frac{T_{max} - T_0}{1{,}5U^2_{п.п} f_п \operatorname{tg} \delta_{ср} \lg 1{,}8\frac{T_п}{t_ф}}$; $\Gamma \geqslant 1{,}11 \cdot 10^{-6} \frac{U_{п.п}}{\sqrt{t_ф}}$; $\frac{I}{C_н} \geqslant \frac{\pi U_{п.п}}{2}\sqrt{\frac{f_п}{t_ф}}$
	$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$; $t_{в1} \neq t_{в2}$	$R_{max}C_н \leqslant \frac{T_{max} - T_0}{1{,}4U^2_{п.п} f_п \operatorname{tg} \delta_{ср} \lg \frac{t_{в1} + t_ф}{0{,}17t_ф}}$; $\Gamma \geqslant 1{,}11 \cdot 10^{-6} \frac{U_{п.п}}{\sqrt{t_ф}}$; $\frac{I}{C_н} \geqslant \frac{\pi U_{п.п}}{2}\sqrt{\frac{f_п}{t_ф}}$
	$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$; $t_{в1} = 0$	$R_{max}C_н \leqslant \frac{T_{max} - T_0}{1{,}1U^2_{п.п} f_п \operatorname{tg} \delta_{ср}}$; $\Gamma \geqslant 0{,}78 \cdot 10^{-6} \frac{U_{п.п}}{\sqrt{t_ф}}$; $\frac{I}{C_н} \geqslant \frac{\pi U_{п.п}}{2}\sqrt{\frac{f_п}{t_ф}}$

Продолжение табл. 5-2

Форма напряжения	Параметры	Соотношение для выбора конденсатора
	$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$; $t_{в1} = t_{в2}$	$R_{max}C_н \leqslant \frac{T_{max} - T_0}{1{,}5U^2_{п.п}f_п \operatorname{tg}\delta_{ср} \lg 1{,}4\,\frac{T_п}{t_ф}}$; $\Gamma \geqslant 10^{-6}\frac{U_{п.п}}{\sqrt{t_ф}}$; $\frac{I}{C_н} \geqslant \sqrt{2}\,U_{п.п}\sqrt{\frac{f_п}{t_ф}}$
	$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$; $t_{в1} \neq t_{в2}$	$R_{max}C_н \leqslant \frac{T_{max} - T_0}{1{,}4U^2_{п.п}f_п \operatorname{tg}\delta_{ср} \lg \frac{t_{в1} + t_ф}{0{,}22t_ф}}$; $\Gamma \geqslant 10^{-6}\frac{U_{п.п}}{\sqrt{t_ф}}$; $\frac{I}{C_н} \geqslant \sqrt{2}\;U_{п.п}\sqrt{\frac{f_п}{t_ф}}$
	$t_{ф1} = t_{ф2} = t_ф$; $t_{в1} = 0$	$R_{max}C_н \leqslant \frac{T_{max} - T_0}{0{,}9U^2_{п.п}f_п \operatorname{tg}\delta_{ср}}$; $\Gamma \geqslant 0{,}71 \cdot 10^{-6}\frac{U_{п.п}}{\sqrt{t_ф}}$; $\frac{I}{C_н} \geqslant \sqrt{2}\,U_{п.п}\sqrt{\frac{f_п}{t_ф}}$

Продолжение табл. 5-2

Форма напряжения	Параметры	Соотношение для выбора конденсатора
	$t_{ф1} = t_{ф2} = \frac{T_п}{2}$; $t_{в1} = t_{в2} = 0$	$R_{max}C_н \leqslant \frac{T_{max} - T_0}{0{,}54U^2_{п.п}f_п \operatorname{tg}\delta_{ср}}$; $\frac{I}{C_н} \geqslant 2U_{п.п}f_п$
	$t_{ф1} > t_{ф2} = t_ф$; $t_{в1} = t_{в2} = 0$	$R_{max}C_н \leqslant \frac{T_{max} - T_0}{0{,}73U^2_{п.п}f_п \operatorname{tg}\delta_{ср}\left(\frac{T_п}{T_п - t_ф}\right)^2 \lg 0{,}7\frac{T_п}{t_ф}}$; $\Gamma \geqslant 10^{-6}\frac{U_{п.п}}{\sqrt{t_ф}}$; $\frac{I}{C_н} \geqslant U_{п.п}\sqrt{\frac{1}{t_{ф1}t_{ф2}}}$
	$t_{ф1} + t_{в1} = t_{ф2} + t_{в2} = t_{ф3} + t_{в3} = \frac{T_п}{3}$; $t_{ф3} = t_{ф2} = \frac{t_{ф1}}{2} = \frac{t_ф}{2}$	$R_{max}C_н \leqslant \frac{T_{max} - T_0}{1{,}1U^2_{п.п}f_п \operatorname{tg}\delta_{ср}\lg 1{,}2\frac{T_п}{t_ф}}$; $\Gamma \geqslant 10^{-6}\frac{U_{п.п}}{\sqrt{t_ф}}$; $\frac{I}{C_н} \geqslant U_{п.п}\sqrt{\frac{3}{2}\frac{f_п}{t_ф}}$

Примечания: 1. Значение $\operatorname{tg}\delta_{ср}$ выбирается по частотной зависимости $\operatorname{tg}\delta(\omega)$ на средней частоте, которая рассчитывается по формуле, приведенной в табл. 4-3.

2. Значения коэффициента Г см. табл. 5-1.

конденсатора, требуемое номинальное напряжение следует выбирать также из следующих условий:

$$U'_{\text{н}} \geqslant U_{\text{п.п}}/2\sqrt{2}; \tag{5-13}$$

$$U''_{\text{н}} \geqslant U_{\text{п}}/\sqrt{2}, \tag{5-14}$$

если применяемый конденсатор разработан для синусоидального напряжения, и

$$U^{\text{III}}_{\text{н.п.п}} \geqslant U_{\text{п.п}}; \tag{5-15}$$

$$U^{\text{IV}}_{\text{н.п}} \geqslant U_{\text{п}}, \tag{5-16}$$

если конденсатор разработан для напряжения несинусоидальной формы.

В (5-15), (5-16) $U_{\text{н.п.п}}$ и $U_{\text{н.п}}$ обозначают соответственно полный размах и амплитуду напряжения в номинальном режиме. Если напряжение типовой формы содержит постоянную составляющую (U'_0), то необходимо, чтобы выполнялось также условие $U'_0 \leqslant U''_0$, где U''_0 — допустимая для данного конденсатора постоянная составляющая напряжения.

Выбор оптимального варианта осуществляется так же, как это описано в § 5-3.

Вопросу выбора конденсаторов для работы при типовых формах напряжения посвящено сравнительно большое количество статей [5-3, 5-5÷5-16, П-4]. Методика выбора конденсаторов продолжает совершенствоваться.

Так, в [5-4] рассмотрен способ определения номинального (и допустимого) напряжения симметричной трапецеидальной формы для конденсаторов типа К75-10 с помощью номограммы (рис. 5-5) для $\tau = 5000$ ч.

Порядок определения номинальной емкости конденсатора показан на номограмме пунктирной линией. На свободном поле номограммы показан порядок определения допустимой амплитуды трапецеидального напряжения. Преимущество рассмотренного графического метода выбора — простота определения всех допустимых параметров трапецеидального напряжения (U_{max}, $f_{\text{п}}$, $t_{\text{ф}}$), а также допустимой температуры охлаждающей среды и выбора оптимального конденсатора.

В тех случаях, когда конструкция конденсатора неизвестна, т. е. неизвестны параметры T_{max}, R_{max} и значение коэффициента Г, определение оптимальной емко-

сти и схемы соединения конденсаторов в батарее можно осуществить приближенно следующим образом.

Если для конденсатора приведены зависимости допустимого напряжения от частоты, то можно рассчитать частотные зависимости мощности потерь энергии в конденсаторе и действующего значения тока. По рассчитанным частотным зависимостям определяются наи-

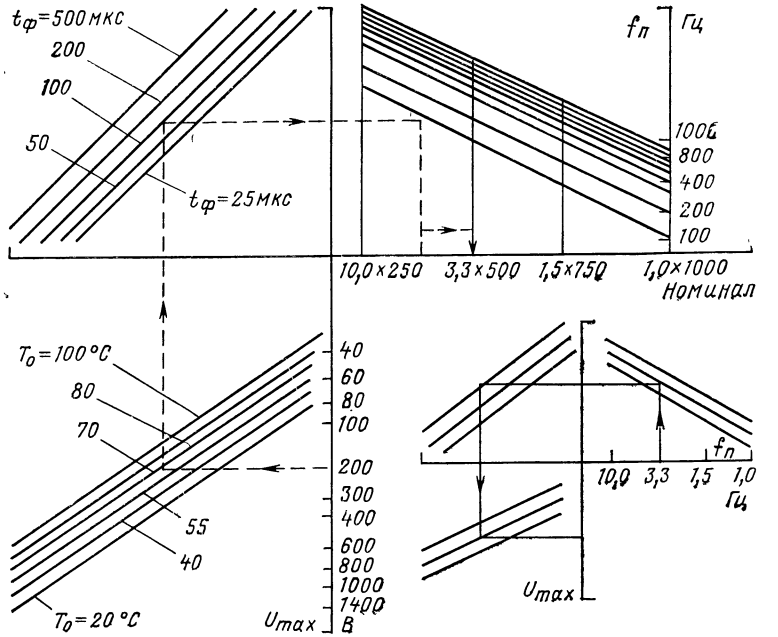


Рис. 5-5. Номограмма для определения номинального и допустимого рабочего напряжения конденсаторов типа К75-10 при τ=5000 ч.

большие значения мощности потерь и ток, которые принимаются за предельно допустимые. Тогда условия, из которых определяется количество последовательно соединенных конденсаторов, можно представить в виде

$$\left.\begin{aligned} n' &= E\left\{\sqrt{\frac{P}{P_m}}+1\right\} \text{ при } P>P_m \text{ и } n'=1 \\ &\quad \text{при } P\leqslant P_m; \\ n'' &= E\left\{\frac{I}{I_m}+1\right\} \text{ при } I>I_m \text{ и } n''=1 \\ &\quad \text{при } I\leqslant I_m, \end{aligned}\right\} \quad (5\text{-}17)$$

где P_m, I_m — максимально допустимые значения мощности потерь и действующего значения тока для данного конденсатора; символ $E\{x\}$ означает «целая часть»; P и I — мощность потерь и действующее значение тока в режиме, в котором необходимо применить конденсатор.

В том случае, если для конденсатора не даны зависимости допустимого напряжения от частоты, т. е. известен только один допустимый режим работы, в (5-17) вместо P_m и I_m следует подставить значения P и I, вычисленные для этого режима.

Необходимо учитывать также характер работы конденсатора в базовом режиме, поскольку часто такие конденсаторы разрабатывают для повторно-кратковременного режима[1]. В таких случаях допустимая мощность тепловыделения и действующее значение тока находятся с учетом повторности включения $P_{\text{доп}}=P_m k_{\text{ПВ}}$ при $t_{\text{р}} \ll \tau_T$ (см. § 2-3), $I_{\text{доп}}=\sqrt{(I_m)^2 k_{\text{ПВ}}}$.

Кроме соотношений (5-17) для обеспечения электрической прочности, число последовательно включаемых конденсаторов должно определяться с учетом соотношений (5-12), т. е.

$$\left.\begin{aligned} n^{\text{III}} &= E\{U_{\text{п}}/U_{\text{п.доп}}+1\} \text{ при } U_{\text{п}} \neq U_{\text{п.доп}} \\ &\text{и} \\ n^{\text{III}} &= U_{\text{п}}/U_{\text{п.доп}} \text{ при } U_{\text{п}}=U_{\text{п.доп}}; \\ n^{\text{IV}} &= E\{U_{\text{п.п}}/U_{\text{п.п.доп}}+1\} \text{ при } U_{\text{п.п}} \neq U_{\text{п.п.доп}} \\ &\text{и} \\ n^{\text{IV}} &= U_{\text{п.п}}/U_{\text{п.п.доп}} \text{ при } U_{\text{п.п}}=U_{\text{п.п.доп}}, \end{aligned}\right\} \quad (5\text{-}18)$$

где $U_{\text{п}}$, $U_{\text{п.п}}$ — амплитуда и полный размах напряжения в заданном режиме; $U_{\text{п.доп}}$, $U_{\text{п.п.доп}}$ — те же параметры в базовом (номинальном) режиме.

В качестве примеров рассмотрим выбор коммутирующих конденсаторов для ТП.

Пример. Необходимо выбрать коммутирующие конденсаторы для импульсного регулятора постоянного тока и определить схему их соединения в батарее при следующих условиях эксплуатации. Форма воздействующего на конденсаторы напряжения —

[1] Для повторно-кратковременного режима разработаны, в частности, конденсаторы К77-5, К72-11, ГСТ, РСТ, РСТО.

гребенчатая (см. рис. 1-4,*б*), $U_{п\,п}=2000$ В, $U^{-}{}_{+max}=1600$ В, $U^{-}{}_{max}=-400$ В, $f_{п\,max}=400$ Гц, $f_{п\,min}=100$ Гц, $t_{ф1}=t_{ф2}=100\times\times10^{-6}$ с. Требуемая емкость $C=20{,}0$ мкФ, точность $\Delta C=\pm10\%$. Режим работы — периодический, повторно-кратковременный с ПВ=30% и периодом $T_ц=10$ мин. Закон изменения частоты во времени — линейный. Температура охлаждающей среды $T_0=-20°\div 65°$С, охлаждение — естественное, воздушное. Необходимый срок службы $\tau=20\cdot10^3$ ч. Перенапряжения при пуске ТП 150% длительностью 0,1 с.

Выбор конденсатора. Так как конденсатор высокого напряжения и срок службы достаточно большой, то согласно данным табл. П-1 выбираем в качестве кандидатов на применение конденсаторы типа РСТ и ПЖ, для которых соответственно $U_{п.п}=$ $=6{,}3\cdot10^3$ В и $4\cdot10^3$ В. $|U^{+}_{max}|=|U^{-}_{max}|=3{,}15\cdot10^3$ В и $2\cdot10^3$ В. Наибольшие значения $U_{п.п}$ и U_{max} в рабочем режиме (периодически повторяющаяся): $U_{п\,п}=1{,}5\cdot2000=3\cdot10^3$ В и $U_{max}=1{,}5\cdot1600=$ $=2400$ В. Поэтому для заданного режима необходимо последовательное включение двух конденсаторов типа ПЖ и достаточно одного конденсатора типа РСТ.

Для заданного режима рассчитываем среднюю частоту, исходя из линейного закона изменения частоты в рабочую часть цикла:

$$f_{ср}=(f_{min}+f_{max})/2=(100+400)/2=250\ \text{Гц}.$$

Используя (5-17), находим число последовательно включенных конденсаторов типа РСТ n' и n'':

$$n'=E\left\{\sqrt{\frac{1{,}1\,(2\cdot10^3)^2\,\mathrm{tg}\,\delta_{ср}\,250\cdot0{,}3}{1{,}1\,(6{,}3\cdot10^3)^2\,\mathrm{tg}\,\delta_{ср}\,400\cdot0{,}5}}+1\right\}=1;$$

$$n''=E\left\{\frac{\pi\cdot2\cdot10^3\cdot4{,}15\cdot10^{-6}\sqrt{\dfrac{250}{100\cdot10^{-6}}}\sqrt{0{,}3}}{\pi\cdot6{,}3\cdot10^3\cdot4{,}15\cdot10^{-6}\sqrt{\dfrac{400}{176\cdot10^{-6}}}\sqrt{0{,}5}}+1\right\}=1.$$

Для конденсаторов ПЖ

$$n'=E\left\{\sqrt{\frac{1{,}1\,(2\cdot10^3)^2\,\mathrm{tg}\,\delta_{ср}\cdot250\cdot0{,}3}{1{,}1\,(2\cdot10^3)\,\mathrm{tg}\,\delta_{ср}\cdot500\cdot1}}+1\right\}=1.$$

Таким образом, по условию тепловыделения в конденсаторах допустимо применение одного конденсатора. Окончательно: батарея из конденсаторов типа РСТ состоит из $20/4{,}15\approx5$ — параллельно включенных конденсаторов, а батарея из конденсаторов типа ПЖ-2000-10,0 — из восьми конденсаторов по последовательно-параллельной схеме включения (две группы из четырех параллельных конденсаторов включены последовательно).

Суммарная емкость конденсаторов типа РСТ в батарее

$$C=5\cdot4{,}15=20{,}8\ \text{мкФ}$$

и типа ПЖ

$$C=8\cdot10{,}0=80{,}0\ \text{мкФ}.$$

Установленную мощность конденсаторов типов РСТ и ПЖ рассчитываем по (3-41)

$$Q'_{\text{у}} = \left(\frac{3{,}15\cdot 10^3}{\sqrt{2}}\right)^2 \cdot 2\pi \cdot 400 \cdot 20{,}8 \cdot 10^{-6} = 262 \text{ квар};$$

$$Q''_{\text{у}} = \left(\frac{2\cdot 10^3}{\sqrt{2}}\right)^2 \cdot 2\pi \cdot 500 \cdot 80 = 500 \text{ квар}.$$

Используя данные по удельным параметрам конденсаторов (см. табл. П-1), находим массу и объем батарей из конденсаторов типов РСТ и ПЖ

$$M'=262/1{,}4=187 \text{ кг}; \quad V'=262/2{,}8=93 \text{ дм}^3;$$

$$M''=500/21=24 \text{ кг}; \quad V''=500/35=14{,}5 \text{ дм}^3.$$

По массо-габаритным характеристикам окончательно выбираем вариант батареи, сформированной из конденсаторов типа ПЖ-2000-10.

Пример. Необходимо выбрать коммутирующие конденсаторы для автономного инвертора напряжения и определить их схему соединения в батарее при следующих условиях эксплуатации.

Форма воздействующего напряжения—трапецеидальная (рис. 1-4,*а*) $U_{\text{п.п}}=800$ В, $U^{+}_{max}=700$ В, $U^{-}_{max}=-100$ В, $f_{\text{п}}=150$ Гц $=\text{const}$, $t_{\text{ф1}}=t_{\text{ф2}}=80\cdot 10^{-6}$ с, требуемая емкость $C=40{,}0$ мкФ, точность $\pm 10\%$, режим работы — длительный, простой, температура охлаждающей среды $T_0=-60\div+70°\text{C}$, перенапряжения на конденсаторах при пуске инвертора 130% длительностью 0,1 с.

Выбор конденсатора. В соответствии с воздействующим напряжением, частотой повторения и требуемой емкостью коммутирующего конденсатора по табл. П-1 и П-2 выбираем следующие типы конденсаторов: К77-5, К75-10 и К42-15.

По номограмме рис. 5-5 находим, что в заданном режиме можно применить конденсатор типа К75-10-750-1,5. Применив к нему условие (5-12), определяем $U_0 \approx 700-100=600$ В. Оно меньше, чем $U_{0\,\text{доп}}=750\cdot 1{,}0=750$ В. В переходном режиме $U_{max}=1{,}3\cdot 700=910<\sqrt{2}\cdot 750=1060$ В.

Таким образом, батарея коммутирующих конденсаторов должна состоять из $40/1{,}5\approx 27$ — параллельно включенных конденсаторов типа К75-10-750-1,5.

Для выбора конденсаторов типа К42-15 применим формулы (5-18) и табл. 5-2.

Согласно (5-18)

$$n^{\text{III}} = E\{1{,}3\cdot 700/630+1\}=2; \quad n^{\text{IV}} = E\{800/630+1\}=2,$$

т. е. из условия обеспечения электрической прочности необходимо включить два конденсатора последовательно.

Применяя формулы табл. 5-2, получаем для двух последовательно включенных конденсаторов

$$R_{max}C_{\text{н}} \leqslant \frac{90-70}{1{,}5\left(\frac{800}{2}\right)^2 \cdot 150 \cdot 0{,}8\cdot 10^{-2} \lg 1{,}8 \frac{10^6}{100\cdot 150}} =$$

$$= 39\cdot 10^{-6}.$$

Из табл. 2-1 для конденсаторов типа К42-15 находим $R_{max}C_н=32{,}8\cdot10^{-6}$ (для $C_н=4{,}0$ мкФ) и $R_{max}C_н=47\cdot10^{-6}$ (для $C_н=10{,}0$ мкФ). Принимаем окончательно вариант батареи, состоящей из двух групп параллельно включенных 20 конденсаторов К42-15-630-4,0 с последовательным соединением обеих групп.

Для выбора конденсаторов типа К77-5 применим упрощенный подход.

Допустимую мощность потерь и ток в этих конденсаторах в длительном режиме находим, учитывая характеристики повторно-кратковременного режима (ПВ=20%):

$$P_{доп}=U^2_н\cdot2\pi\cdot3\cdot10^3\,\mathrm{tg}\,\delta C_н\cdot0{,}2;$$

$$I_{доп}=U_н\cdot2\pi\cdot3\cdot10^3U_нC_н\sqrt{0{,}2}.$$

Из условия обеспечения электрической прочности необходимо применить конденсаторы с $U_н=500$ В, для которых

$$U_{п.доп}=\sqrt{2}\cdot500=707\ \text{В}>U^+_{max}=700\ \text{В}$$

и

$$U_{п.п\ доп}=2\sqrt{2}\cdot500=1414>800\ \text{В}.$$

Используя соотношения (5-17), получаем:

$$n'=E\left\{\sqrt{\frac{1{,}5\,(800)^2\cdot150C_н\,\mathrm{tg}\,\delta_{ср}\lg1{,}8\dfrac{10^6}{150\cdot200}}{U^2_н\cdot2\pi\cdot3\cdot10^3\,\mathrm{tg}\,\delta C_н\cdot0{,}2}}+1\right\}=1;$$

$$n''=\left\{\frac{\dfrac{\pi\cdot800C_н}{4}\sqrt{\dfrac{150}{200\cdot10^{-6}}}}{U_н\cdot2\pi\cdot3\cdot10^3C_н\sqrt{0{,}2}}+1\right\}=1.$$

Таким образом, батарею коммутирующих конденсаторов можно составить из конденсаторов типа К77-5-500-3,3 (12 шт. параллельно). Габариты и массу конденсаторных батарей из конденсаторов типов К75-10, К42-15 и К77-5 рассчитываем по объему и массе единичного конденсатора. Данные приведены в табл. 5-3.

Таблица 5-3

Тип конденсатора	Масса одного конденсатора	Объем одного конденсатора	Количество конденсаторов в батарее	Масса батареи, кг	Объем батареи, дм³
К75-10	0,5	0,22	27	13,5	6
К42-15	0,34	0,16	40	13,6	6,4
К77-5	0,45	0,25	12	5,4	3

Из данных табл. 5-3 в заданных условиях оптимальным является конденсатор типа К77-5-500-3,3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показано в § 3-4, 5-3 и 5-4, существует большое разнообразие методик выбора конденсаторов, различающихся количеством априорной информации, т. е. уровнем знаний о конденсаторе и режиме его использования. Наиболее обоснованный выбор можно осуществить на основе полной информации, включающей следующие сведения:

1) о режиме работы конденсатора: форма тока или напряжения, характер нагрузки, расположение в батарее, условия охлаждения;

2) о самом конденсаторе: температурно-частотные характеристики конденсатора (C и $\operatorname{tg}\delta$) и на их основе данные критического теплового режима; параметры электрической схемы замещения: r_Σ, R_i, C_i, $L_э$, C_0; параметры тепловой схемы замещения: R_{max}, $R_н$, $\tau_т$; характеристики устойчивости конденсатора к импульсным токам $\Gamma(t_ф)$; экстремальные значения допустимых эксплуатационных параметров в длительных и кратковременных режимах: максимальная температура диэлектрика, постоянная составляющая напряжения, максимальное значение и полный размах напряжения от пика до пика; механизмы отказов и модели старения, учитывающие значения эксплуатационных параметров: T_{max}, U_0, $U_п$, $U_{п.п}$, а также форму и частоту воздействующего напряжения.

Правильность выбора может быть проверена экспериментально путем измерения следующих параметров: температуры корпуса конденсатора, параметров конденсатора, зависящих от температуры ($R_{ут}$, C, $\operatorname{tg}\delta$), и оценке по ним максимальной температуры внутри конденсатора; периодического контроля температурной характеристики $\operatorname{tg}\delta(T)$ и оценке по ней скорости старения.

В разрабатываемых в настоящее время системах автоматизированного проектирования преобразовательных устройств должны содержаться банк данных о конденсаторах и подсистема выбора конденсаторов и проектирования батареи.

Основные параметры конденсаторов для силовых

Тип конденсатора	Номинальные параметры				Долговечность, ч	Диэлектрик
	$U_н$, В	f, Гц	$C_н$, мкФ	$T_{min}—T_{max}$, °С		
ГСТ-1-50У2	3150	800 400	2,12 4,0	—50 ÷ +40	$5 \cdot 10^4$	Б+ПХД
РСТ-2-2,12У2 РСТ-2-4У2	3150	800 400	2,12 4,0	—50 ÷ +40	$5 \cdot 10^4$	Б+ПХД
РСТО-2-6,15У2	3150	400	6,15	—50 ÷ +40	$5 \cdot 10^4$	Б+ПХД
ПС-0,3-0,4*	300	400	50,0	—	$4 \cdot 10^4$	Б+ТХД
ПСК-0,45-30	400	250	30,0	—50 ÷ +40	$4 \cdot 10^4$	Б+ПП+ПХД
ПСК-0,7-20	700	70	20,0	—50 ÷ +40	$4 \cdot 10^4$	Б+ПП+ПХД
ПСК-0,7-30	700	70	30,0	—50 ÷ +40	$4 \cdot 10^4$	Б+ПП+ПХД
ПСК-0,7-45	700	70	45,0	—50 ÷ +40	$4 \cdot 10^4$	Б+ПП+ПХД
ПСК-1,25-40	1250	60	40,0	—50 ÷ +40	$4 \cdot 10^4$	Б+ПП+ПХД
ПСК-1,25-200	1250	60	200,0	—50 ÷ +40	$4 \cdot 10^4$	Б+ПП+ПХД
ПС-300-0,4	300	400	1,0; 5,0; 10,0	—50 ÷ +50	—	Б+ПХД
ПС-400-0,4	400	400	3,5	—50 ÷ +50	—	Б+ПХД
ПТ-80-0,5	80	500	40,0	—50 ÷ +50	—	ПЭТФ+ЭК
ПТ-160-0,1	160	100	2,5 ÷ 250,0	—50 ÷ +50	—	ПЭТФ+ЭК
ПТ-160-0,5	160	500	40,0	—50 ÷ +50	—	ПП+ЭК

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

преобразовательных устройств

Таблица П-1

Обкладки	Удельные параметры				Основное назначение, режим работы, вид охлаждения
	q_V, квар/дм³	$q_м$, квар/кг	C_V, мкФ/дм³	C_M, мкФ/кг	
Ф	2,8	1,4	0,13	0,065	Форма напряжения см. рис. 1-4, *б*; ПВ-0,5. Охлаждение принудительное, воздушное, $v = 10$ м/с
Ф	2,8	1,4	0,13	0,065	Форма напряжения, см. рис. 1-4, *г*
Ф	4,2	2,1	0,2	0,065	Охлаждение принудительное воздушное, $v = 10$ м/с
Ф	3,6	1,9	16,0	8,3	Коммутирующий, напряжение, близкое к синусоидальному
Ф	1,23	0,9	7,0	5,0	Коммутирующий, форма напряжения см. рис. 1-4, *а*; $t_ф = 110 \cdot 10^{-6}$ с
Ф	0,51	0,37	4,6	3,3	То же
Ф	0,77	0,55	7,0	5,0	То же
Ф	1,15	0,85	10,5	7,5	То же
Ф	2,74	2,0	9,3	6,7	Коммутирующий, форма напряжения см. рис. 1-4, *в*, $t_{ф1} = 10^{-3}$ с $t_{ф2} = t_{ф3} = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ с
Ф	3,7	2,0	12,5	6,7	То же
Ф	3,2—5,1	2,1—2,5	13—22	9—11	Коммутирующий, напряжение, близкое к синусоидальному
Ф	2,9	1,4	14,5	7,0	Коммутирующий, форма напряжения см. рис. 1-4, *а*; $t_ф = 80 \cdot 10^{-6}$
ДМБ	1,8	1,0	125	100	Коммутирующий, форма напряжения см. рис. 1-4, *а*; $t_ф = 150 \cdot 10^{-6}$ с
ДМБ	1,6	1,25	180—250	140—180	То же, $t_ф = 200 \cdot 10^{-6}$ с
ДМБ	2,35	1,6	59,0	40,0	То же, $t_ф = 150 \cdot 10^{-6}$ с

Тип конденсатора	Номинальные параметры				Долговечность, ч	Диэлектрик
	$U_{\text{ном}}$, В	f, Гц	$C_{\text{н}}$, мкФ	T_{min}—T_{max}, °С		
ПТ-300-0,4	300	400	10,0	—50 ÷ +50	—	ПП+ЭК
ПТР-160-0,1	160	100	25—250,0	—50 ÷ +50	—	ПЭТФ+ЭК
ПТР-200-0,2	200	200	400	—50 ÷ +50	—	Б+ПЭТФ+ЭК
ПТР-300-0,4	300	400	3·(21—1000)	—50 ÷ +50	—	ПП+ЭК
ПТР-400-0,4	400	400	42,0	—50 ÷ +50	—	Б+ПЭТФ+ЭК
ПТР-600-0,5	600	500	6,3	—50 ÷ +50	—	Б+ПЭТФ+ЭК
ПТР-1200-0,3	1200	300	20,0	—50 ÷ +50	—	Б+ПЭТФ+ЭК
ПТР-2400-0,4	2400	400	1,0	—50 ÷ +50	—	Б+ПЭТФ+ЭК
ПЖ-160-0,1	160	100	50,0	—50 ÷ +50	—	ПП+КО
ПЖ-450-0,5	450	500	10,0	—50 ÷ +45	—	ПП+КО
ПЖ-600-1,2	600	1200	10,0	—50 ÷ +50	—	ПП+КО
ПЖ-600-0,6	600	600	12,5	—50 ÷ +50	—	ПП+КО
ПЖ-2000-0,5	2000	500	10,0	—50 ÷ +50	—	ПП+КО
ПЖ-3000-0,2	3000	200	5,0	—50 ÷ +50	—	ПП+КО
К42-15	400 630 1000	—	0,25—20,0	—60 ÷ +70	3000	Б+В
К77-5	250 500 750	3000	0,22—0,7	—60 ÷ +70	3000	ПК
К75-31	300	400	0,47 10	0 ÷ +60	3000	ПТФЭ+Б

Продолжение табл. П-1

Обкладки	Удельные параметры				Основное назначение, режим работы, вид охлаждения
	q_V, квар/дм³	q_M, квар/кг	C_V, мкФ/дм³	C_M, мкФ/кг	
ДМБ	14,4	10,0	62,0	43,0	Коммутирующий, напряжение, близкое к синусоидальному
ДМБ	1,5—2,0	1,2—1,4	180—250	140—160	Коммутирующий, форма напряжения см. рис. 1-4, *а*, $t_ф = 200 \cdot 10^{-6}$ с
ДМБ	1,42	1,2	57,0	47,0	То же, $t_ф = 80 \cdot 10^{-6}$ с
ДМБ	4—6	5—8	13—24	21—30	Коммутирующий; напряжение близкое с синусоидальному
ДМБ+Ф	3,0	3,2	15,0	16,0	Коммутирующий; форма напряжения см. рис. 1-4, *а*, $t_ф = 80 \cdot 10^{-6}$ с, охлаждение принудительное; $v = 3$ м/с
ДМБ+Ф	12,0	17,0	22,0	31,0	То же, $t_ф = 150 \cdot 10^{-6}$ с
ДМБ+Ф	7,8	11,0	4,3	6,0	То же, $t_ф = 200 \cdot 10^{-6}$ с
ДМБ+Ф	10,4	14,1	1,4	2,0	То же
ДМБ	2,0	1,24	250,0	167	Коммутирующий, форма напряжения см. рис. 1-4, *а*, $t_ф = 200 \cdot 10^{-6}$ с
ДМБ	16	10,5	50	33	То же, $t_ф = 200 \cdot 10^{-6}$ с
ДМБ+Ф	17,5	12,5	13	9,1	То же, $t_ф = 150 \cdot 10^{-6}$ с
ДМБ+Ф	8,6	6,0	14	9,5	То же, $t_ф = 150 \cdot 10^{-6}$ с
ДМБ+Ф	35	21	5,4	3,3	То же, $t_ф = 200 \cdot 10^{-6}$ с
ДМБ+Ф	22,3	13,3	4,0	2,4	То же, $t_ф = 200 \cdot 10^{-6}$ с
МТ	0,3—0,4	0,17—0,24	20—25	9—12	Работа в формирующих линиях
МТ	4,8—6,4	2,6—3,3	18—42	10—22	Работа при ПВ=0,2
МТ	7,6	3,4	28	12,5	Форма напряжения см. рис. 1-4, *а*, $t_ф = 75 \cdot 10^{-6}$ с

Тип конденсатора	Номинальные параметры				Долговечность, ч	Диэлектрик
	$U_н$, В	f, Гц	$C_н$, мкФ	$T_{min} - T_{max}$, °С		
К72-11	125—1000	10 000	0,047—4,7	—60 ÷ +70	3000	ПТФЭ+КО
MKV, „Сименс" ФРГ	400—1500	—	0,15—50	—25 ÷ +70	10^5 ($\gamma = 97\%$)	ПП+М
MPK, БОШ, ФРГ	125—800	—	1÷100	—40 ÷ +85	10^5 ($\gamma = 97\%$)	ПК+М
MF, EROS, ФРГ	100—2000	—	5—300	—40 ÷ +40	10^5 ($\gamma = 97\%$)	Б, Б+ПК
SCRG, США	200—2000	—	0,25—50	—30 ÷ +65	$4 \cdot 10^4$ ($\gamma = 95\%$)	Б
RF-28, США	200—2000	—	0,25—150	—30 ÷ +80	$4 \cdot 10^4$ ($\gamma = 95\%$)	Б+ПК

* Конденсаторы имеют климатические исполнения У и Т категории 2 по ГОСТ
** Указаны наибольшие значения.

Примечания: 1. Удельные параметры приведены для номинального режима.
2. Б — бумага, ПХД — полихлордифенил, ТХД — трихлордифенил, ПП — полипропилен, ческая жидкость, ПК — поликарбонат, ПТФЭ — политетрафторэтилен (фторопласт), М —
3. Основные назначение и режим работы указаны в соответствии с ТУ. Возможно при

Основные параметры конденсаторов

Тип конденсатора	Номинальные параметры				Долговечность, ч
	$U_н$, В	$f_н$, Гц	Q, квар	T_0, °С	
КС1 КС2	220—10 500	50	4,5—100	—40 ÷ +40	10^5
КС Исполнение ХЛ	380—10 500	50	25—75	—60 ÷ +40	10^5
КСЭ	1050	50	75 67	—40 ÷ +40 +45	10^5
КСК	660—1050	50	40—150	—40 ÷ +50	10^5
ЭС	500—2000	500—1000		—10 ÷ +35	10^5

Продолжение табл. П-1

Обкладки	Удельные параметры				Основное назначение, режим работы, вид охлаждения
	q_V, квар/дм³	q_M, квар/кг	C_V, мкФ/дм³	C_M, мкФ/кг	
Ф	7—31	2—10	0,25—14	0,09—4,2	ПВ=0,5, напряжение синусоидальное
ДМБ	6—34**	4—20	—	—	Трапецеидальная форма напряжения, du/dt=100 ÷ 250 В/мкс
МТ	6—16**	4—20	—	—	Коммутирующий, трапецеидальная и синусоидальная формы напряжения
Ф	6—16**	4—20	20 (U=150, 300 В)	12,5	Коммутирующий, трапецеидальная и синусоидальная формы напряжений
Ф	1,4—2,9	—	40	—	То же
Ф, МТ	1,1—2,9	—	—	—	То же

15543-70 и ГОСТ 15150-69.

ПЭТФ — полиэтилентерефталат (лавсан) ЭК — эпоксидный компаунд, КО — кремнийорганимасло, Ф — фольга, МТ — металлизация, ДМБ — двустороннеметаллизированная бумага. менение конденсаторов и при других формах и параметрах напряжения.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

для синусоидального напряжения

Таблица П-2

Диэлектрик	Обкладки	Удельные параметры		Основное назначение, режим работы, вид охлаждения
		q_V, квар/дм³	q_M, квар/кг	
Б+ТХД	Ф	0,6—3,5	0,28—1,6	Повышение коэффициента мощности электроустановок промпредприятий
Б+ПХД	Ф	0,6—3,5	0,28—1,6	Повышение коэффициента мощности электроустановок в районах с холодным климатом
Б+ТХД	Ф	2,3—2,6	1,1—1,2	Компенсация реактивной мощности индукционных печей
Б+ПП+ТХД	Ф	2,7—5,4	1,5—2,6	Повышение коэффициента мощности электроустановок
Б+ТХД	Ф	1,4—2,4	0,6—1,1	Повышение коэффициента мощности электротермических установок

Тип конденсатора	Номинальные параметры				Долговечность, ч
	$U_н$, В	$f_н$, Гц	Q, квар	T_0, °С	
ЭСВ	500—2000	500—10 000	200—400	+5 ÷ +40	—
ЭСК	500—2000	500—1000	До 100	—10 ÷ +40	—
ЭСКВ	500—2000	500—10 000	До 600	5 ÷ 40	—
ЭСП-0,5-10-400	500	10 000	400	5 ÷ 40	—
КСБП	10 500	50	75 100 150	—40 ÷ 40	—
КСПР	500	5000	236	—30 ÷ +40	10^5
ЛСМ	250—400	50	0,09—5,0	—30 ÷ +50	30 000
МБГЧ	250—1000	50	До 0,31	—60 ÷ +70	5000
К75-10	250—1000	50	о 0,31	—60 ÷ +85	5000
К71-4	160* 250	—	C=0,01 ÷ 10,0 мкФ	—60 ÷ +85	10 000
К79-2	200* 300 500	—	C=0,01 ÷ 2,2 мкФ	—60 ÷ +200	3000
К73П-2	400* 630 1000	—	C=0,5÷15,0 мкФ C=0,25 ÷ 10,0 мкФ C=0,5÷10,0 мкФ	—60 ÷ +125	10^4 (+70°C)
ЛСЕ	400	50	0,15—0,4	—30 ÷ +50	$4 \cdot 10^4$
БКС	250/400	50	0,6/0,16 0,9/0,18	—20 ÷ +50	$3 \cdot 10^4$
„Магвар", „Дженерал Электрик", США	400—10 000	50/60	40—400	—40 ÷ +40	10^5
RIC Англия	220—250	50—60	0,05—0,4	—40 ÷ +85	10^4

Продолжение табл. П-2

Диэлектрик	Обкладки	Удельные параметры		Основное назначение, режим работы, вид охлаждения
		q_V, квар/дм³	q_M, квар/кг	
Б+ТХД	Ф	12—25	6—11	Повышение коэффициента мощности электротермических установок, охлаждение водяное
Б+ПП+ТХД	Ф	6,8—17	3,3—7	Повышение коэффициента мощности электротермических установок
Б+ПП+ТХД	Ф	25—50	11—22	То же, охлаждение водяное
ПП+ТХД	Ф	27	13,6	Повышение коэффициента мощности электротермических установок
Б+ПП+ТХД	Ф	5	3,2	Компенсация реактивной мощности промышленных предприятий
ПС	Ф	14,7	7,4	Компенсация реактивной мощности в системе высокочастотного питания
Б+ТХД	Ф	0,6—1,87	0,33—1,0	Компенсация реактивной мощности люминесцентных ламп светильников
М Б+В	МТ	1,2—1,4	0,6—0,75	Работа в цепях постоянного, пульсирующего и переменного токов
Б+ПЭТФ+О	МТ	1,4—1,6	0,75—0,8	То же и в импульсном режиме
САМП	ДМБ	До 20,0	До 12,8	То же
ПТФЭ	МТ+Ф	До 8,8	До 3,3	То же
ПЭТФ	МТ	1,4	0,7	То же
Б+ТХД	Ф	1,4—1,7	0,7—0,9	Компенсация реактивной мощности люминесцентных светильников
Б+ТХД	Ф	0,85/0,2	0,4/0,1	Пусковые и рабочие конденсаторы асинхронных однофазных двигателей
Б+ПП+ТХД	Ф	2,8—6,4	1,8—3,4	Компенсация реактивной мощности электроустановок промышленных предприятий
ПП	МТ	2—2,6	—	Компенсация реактивной мощности люминесцентных светильников

Тип конденсатора	Номинальные параметры				Долговечность, ч
	$U_н$, В	$f_н$, Гц	Q, квар	T_0, °С	
MV, Англия	380—700	50—60	25—50	30	—
MKV, „Сименс", ФРГ	400—1650	50—60	2—18	—10 ÷ +40	10^5
MKV, „Сименс", ФРГ	400—660	500	120 180	—25 ÷ +70	10^5
KAPSCH, Австрия	625	50	100	—	—
NOKIA, Финляндия	660	50	66	—	—
Стандарт 1,25 „Арко", Италия	280—800	40—60	0,05—2,0	—20 ÷ +85	—

* Напряжение постоянного тока.

Примечания: 1. ПС — полистирол, О — октол, САМП — пленка, сополимер поли
2. См. примечания к табл. П-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

П-1. **Ренне В. Т.** Электрические конденсаторы. М.: Энергия, 1969. 592 с.

П-2. **Ренне В. Т., Багалей Ю. В., Фридберг И. Д.** Расчет и конструирование конденсаторов. Киев: Техніка, 1966. 324 с.

П-3. **Силовые** электрические конденсаторы/ Кучинский Г. С., Назаров Н. И., Назарова Г. Т. и др. М.: Энергия, 1975. 248 с.

П-4. **Ануфриев Ю. А., Гусев В. Н., Смирнов В. Ф.** Эксплуатационные характеристики и надежность электрических конденсаторов. М.: Энергия, 1976. 225 с.

1-1. **Бедфорд Б., Хофт Р.** Теория автономных инверторов. М.: Энергия, 1969. 280 с.

1-2. **Тиристоры** (технический справочник)/ Пер. с англ. под ред. В. А. Лабунцова, С. Г. Обухова, А. Ф. Свиридова. М.: Энергия, 1971. 560 с.

1-3. **Автономные** инверторы/ Гончаров Ю. П., Ермуратский В. В., Заика Э. И. и др. Кишинев: Штиинца, 1974. 336 с.

1-4. **Шиллинг В.** Тиристорная техника. М.: Энергия, 1971. 263 с.

1-5. **Глазенко Т. А., Гончаренко Р. Б.** Полупроводниковые преобразователи частоты для регулируемых электроприводов. Л.: Энергия, 1969. 184 с.

1-6. **Глазенко Т. А.** Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока. Л.: Энергия, 1973. 304 с.

Продолжение табл. П-2

Диэлектрик	Обкладки	Удельные параметры		Основное назначение, режим работы, вид охлаждения
		q_V, квар/дм³	q_M, квар/кг	
Б+ПХД	МТ	1,4—1,5	0,9—1,0	Компенсация реактивной мощности
ПП+М	ДМБ	6,0	—	То же
ПП+М	ДМБ	31,0 34,0	—	Компенсация реактивной мощности установок индукционного нагрева
—	Ф	2,4	1,1	Компенсация реактивной мощности электроустановок
—	Ф	2,6	1,4	То же
Б+М	Ф	1,4—3,0	—	То же

стирола, остальные обозначения см. табл П-1,

1-7. **Бирзниекс Л. В.** Импульсные преобразователи постоянного тока. М.: Энергия, 1974. 256 с.

1-8. **Чиженко И. М., Руденко В. С., Санько В. И.** Основы преобразовательной техники. М.: Высшая школа, 1974. 430 с.

1-9. **Автономные** инверторы на тиристорах с отделенными от нагрузки коммутирующими конденсаторами/ Ситник Н. Х., Некрасов Л. Т., Беркович Е. И. и др. М.: Энергия, 1968. 95 с.

1-10. **Булатов О. Г., Иванов В. С., Панфилов Д. И.** Тиристорные схемы включения высокоинтенсивных источников света. М.: Энергия, 1975. 176 с.

1-11. **Забродин Ю. С.** Узлы принудительной конденсаторной коммутации. М.: Энергия, 1974. 129 с.

1-12. **Автоматизированный** электропривод в промышленности/ Под ред. М. Г. Чиликина, И. И. Петрова, М. М. Соколова и др. М.: Энергия, 1974. 376 с.

1-13. **Толстов Ю. Г.** Автономные инверторы тока. М.: Энергия, 1977. 208 с.

1-14. **Лабунцов В. А.** Анализ и синтез тиристорных автономных инверторов напряжения. Автореф. дис. на соиск. учен. степени д-ра техн. наук. М.: МЭИ, 1973.

1-15. **Преобразователи** частоты на основе автономных инверторов для электроприводов переменного тока/ Акиньшин И. А., Антонов И. А., Дацковский Л. Х. и др. М.: Информэлектро, 1974. 40 с.

1-16. **Ермуратский В. В., Ковалев Ф. И.** Специфика режимов работы конденсаторов силовых полупроводниковых устройств.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1975, вып. 9(53), с. 23—25.

1-17. **Судовые** статические преобразователи/ Ковалев Ф. И., Мосткова Г. П., Свиридов А. Ф. и др. Л: Судостроение, 1965. 214 с.

1-18. **Раскин Л. Я.** Стабилизированные автономные инверторы тока на тиристорах. М.: Энергия, 1970. 93 с.

1-19. **Стабилизированные** автономные инверторы с синусоидальным выходным напряжением/ Ковалев Ф. И., Мосткова Г. П., Чванов В. А. и др. М.: Энергия, 1972. 152 с.

1-20. **Вентильные** преобразователи с конденсаторами в силовых цепях/ Баев А. В., Волков Ю. К., Долинин В. П. и др. М.: Энергия, 1969. 256 с.

1-21. **Глух Е. М., Зеленов В. Е.** Защита полупроводниковых преобразователей. М.: Энергия, 1970. 152 с.

1-22. **Тиристорные** преобразователи высокой частоты/ Беркович Е. И., Ивенский Г. В., Иоффе Ю. С. и др. Л.: Энергия, 1973. 200 с.

1-23. **Ковалев Ф. И., Шишеев А. В.** Разработка серии стабилизированных преобразователей частоты 50—400 Гц.— В кн.: Материалы VIII научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства. Томск: ТГУ, 1974, т. IV, с. 128—130.

1-24. **Розанов Ю. К.** Исследование режимов работы автономных трехфазных параллельных инверторов тока при авариях в цепях нагрузки.— В кн.: Вентильные преобразователи частоты (схемы и коммутационные процессы). Тезисы докладов Всесоюзного совещания. Свердловск: УПИ, 1969, с. 311—315.

1-25. **Аранчий Г. В., Жемеров Г. Г., Эпштейн И. И.** Тиристорные преобразователи частоты для регулируемых электроприводов. М.: Энергия, 1968. 128 с.

1-26. **Забродин Ю. С.** Автономные тиристорные инверторы с широтно-импульсным регулированием. М.: Энергия, 1976. 135 с.

1-27. **Филатов В. Н.** Устройство ускоренного заряда для автомобильных аккумуляторов.— Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1974, вып. 12(59), с. 18—20.

1-28. **Общие** соотношения для расчета узлов коммутации в автономных инверторах/ Гончаров Ю. П., Панасенко Н. В., Темкина Л. М. и др.— В кн.: Преобразование параметров электрической энергии. Киев.: Наукова Думка, 1975, с. 20—24.

1-29. **Панасенко Н. В.** Исследование узлов коммутации шунтирующего действия для преобразователей рудничных электровозов. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук/ Харьков: ХПИ, 1976.

1-30. **Булатов О. Г., Лабунцов В. А., Царенко А. И.** Преобразователь постоянного напряжения в синусоидальный ток.— Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1975. вып. 3(62), с. 8-11.

1-31. **Скороваров В. Е.** Работа вентилей в схемах автономных инверторов с повышенной частотой.— Электричество, 1965, № 3. с. 21—26.

1-32. **Лабунцов В. А., Смирнов В. П.** Расчет элементов, облегчающих работу тиристоров при конденсаторной коммутации.— Электротехника, 1969, № 2, с. 58—60.

1-33. **Башкатов И. П.** Демпфирование скачков напряжения цепочками с нелинейной емкостью.— В кн.: Применение тиристорных преобразователей в электроэнергетике. Материалы I Всесоюзного научно-технического совещания. 1972, вып. 3, ч. 1, М.: ЭНИН, с. 85—95.

1-34. **Акодис М. М., Шипицын В. В., Самоделкина Т. Ф.** Ограничение коммутационных перенапряжений в схеме полупроводникового преобразователя повышенной частоты с антипараллельными вентилями.— В кн.: Вентильные преобразователи частоты. Схемы и коммутационные процессы. Тезисы докладов Всесоюзного совещания. Свердловск: УПИ, 1969, с. 380—388.

1-35. **А. с. 256033 (СССР).** Устройство для защиты тиристоров от перенапряжений/ Аранчий Г. В., Жемеров Г. Г., Эпштейн И. И.— Опубл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки», 1969, № 34.

1-36. **Артемьев Б. Н., Дмитриков В. Ф.** Устройство ограничения коммутационных перенапряжений в инверторах с обратными диодами.— Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1975, вып. 3(62), с. 13—16.

1-37. **Аранчий Г. В., Гошков В. И., Дугин Г. И.** Тиристорный преобразователь частоты для питания систем автоматики электроприводов.— Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1970, вып. 8, с. 3—8.

1-38. **Жежеленко И. В.** Высшие гармоники в системах электроснабжения. М.: Энергия, 1974, с. 184.

1-39. **Добрусин Л. А., Павлович А. Г., Комов В. А.** Экспериментальное исследование фильтрующей части фильтрокомпенсирующих устройств.— В кн.: Повышение качества электрической энергии в распределительных сетях. Киев: АН УССР, 1974, с. 168—172.

1-40. **Немощенко Б. Р.** Конденсаторные установки с широкополосным фильтром высших гармоник.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1973, вып. 7(27), с. 19—20.

1-41. **Средства** улучшения энергетических показателей сетей, питающих преобразовательные установки. Фильтры высших гармоник/ Добрусин Л. А., Павлович А. Г., Сорокин В. А. и др.— Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1972, вып. 4(28), с. 27—31.

1-42. **Завьялов В. И., Конев Ф. Б., Мустафа Г. М.** Оптимизация фильтра выходного напряжения однофазного автономного инвертора.— Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1974, вып. 4(51), с. 14—16.

1-43. **Ямщиков Г. И.** Выходные фильтры однофазных статических преобразователей с одноимпульсным широтным регулированием. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук./ ТПИ. Томск, 1974.

1-44. **Чаплыгин Е. Е.** К расчету силовых фильтров преобразователей частоты с непосредственной связью.— Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1973, вып. 9(44), с. 26—29.

1-45. **Архиреев И. П.** Установленная мощность выходных резонансных фильтров вентильных преобразователей частоты.— Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1972, вып. 8(32)—9(33), с. 19—20.

1-46. **Ермуратский В. В.** К вопросу о коэффициенте гармоник выходного напряжения автономных инверторов тока с параллельны-

ми конденсаторами.— Изв. АН МССР. Серия физико-технических и математических наук, 1967, № 5, с. 30—33.

1-47. **Толстов Ю. Г.** Автономные инверторы.— В кн.: Преобразовательные устройства в электроэнергетике. М.: Наука, 1964, с. 3—38.

1-48. **Режимы** работы, автоматика и защита статического источника реактивной мощности, управляемого тиристорным блоком 35 кВ/ Енин В. Т., Шелепетень Т. М., Карач Л. В. и др.— Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1974, вып. 11(58), с. 23—25.

1-49. **Leisungs**-Kondensatoren Electronische Blindleistungs-regler. — ERO-Starkstromkondensatoren GMBH, 1971.

1-50. **Худяков В. В., Чванов В. А.** Управляемый статический источник реактивной мощности.— «Электричество», 1969, № 1, с. 29—35.

1-51. **А. с. 216824 (СССР).** Устройство для регулирования величины эквивалентной емкости статического конденсатора/ Адамия Г. Г., Ермуратский В. В., Штейнберг А. Ю.— Опубл. в бюл. «Изобретения. Пром. образцы. Товарные знаки», 1968, № 15.

2-1. **Кучинский Г. С.** Высоковольтные импульсные конденсаторы. Л.: Энергия, 1973. 176 с.

2-2. **Теория** диэлектриков/ Богородицкий Н. П., Волокобинский Ю. М., Воробьев А. А. и др. М.: Энергия, 1965. 344 с.

2-3. **Нетушил А. В., Жуховицкий Б. Я., Кудин В. Н.** Высокочастотный нагрев в электрическом поле. М.: Высшая школа, 1961. 146 с.

2-4. **Ренне В. Т.** Пленочные конденсаторы с органическим синтетическим диэлектриком. М.: Энергия, 1971. 240 с.

2-5. **Plessner K. W., McNicholl R., Shen T. E.** Time dependence of loss tangent im impregnated polypropylene capacitors. — Proc. Inst. Elec. Eng., 1974, vol. 121, № 12, p. 1599—1602.

2-6. **Ренне В. Т.** Теоретические основы силового конденсаторостроения.— В кн.: Некоторые вопросы силового конденсаторостроения, М.: Информстандартэлектро, 1967, с. 3-20.

2-7. **Переселенцев И. Ф.** Частичные разряды в диэлектрике силовых бумажных конденсаторов.— Силовое конденсаторостроение. М.: Информстандартэлектро, 1968, вып. 1, с. 52—72.

2-8. **Койков С. Н., Цикин Л. Н.** Электрическое старение твердых диэлектриков. М.: Энергия, 1968. 186 с.

2-9. **Варшавский Д. С.** Электрическая прочность и срок службы силовых конденсаторов переменного тока. М.: Информэлектро, 1975. 81 с.

2-10. **Переселенцев И. Ф., Гинзбург Е. Л.** Работа пропитанного бумажного диэлектрика при критических частичных разрядах.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1975, вып. 10(54), с. 10—12.

2-11. **Проскурин В. П., Переселенцев И. Ф.** Применение синтетических пропитывающих жидкостей в конденсаторостроении.— Силовое конденсаторостроение. М.: Информстандартэлектро, 1968, вып. 1, с. 78—88.

2-12. **Торощин П. А.** Металлобумажные конденсаторы. М.—Л.: Энергия, 1965. 213 с.

2-13. **Zanobetti D.** a. oth. Power capacitors with mixed paper and polypropylene dielectric. — CIGRE, Paris, 1970. Report MM5-04.

2-14. **Багалей Ю. В., Биньков С. В.** Применение комбинированного диэлектрика полипропилен — бумага — эпоксидный компаунд в конденсаторостроении.— Электротехническая промышленность. Электрические материалы, 1974, вып. 8(49), с. 5-7.

2-15. **Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. М.** Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. М.— Л.: Энергия, 1968. 359 с.

2-16. **Чеховский И. Р.** Исследование тепловых режимов и разработка методов теплового расчета силовых электрических конденсаторов. Автореф. дис. на соиск. ученой степени канд. техн. наук./ ТПИ, Томск, 1971.

2-17. **Кременецкий И. И.** Расчет температуры перегрева конденсаторов, работающих в формирующих линиях.— Электронная техника. Серия 8, Радиодетали, 1970, вып. 3(20), с. 27—34.

2-18. **Самовосстанавливающиеся** конденсаторы радиаторного типа для тиристорного электропривода/ Чатинян Ю. С., Акопян В. А., Паронян Б. Г. и др.— Труды ВНИИКЭ, 1973, т. 5, с. 365—378.

2-19. **Переселенцев И. Ф., Гинзбург Е. Л., Жилкин В. Г.** Характеристики и срок службы конденсаторов, пропитанных стабилизированными хлорированными жидкостями.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1974, вып. 12(44), с. 11—13.

2-20. **Pattini G., Simoni L.** Durata di vita dei dielectrici sottosposti a tensione altertata. — «Electrotechnica», 1971, vol. 58, № 1, p. 25—32.

2-21. **Geschäftsbereich** Kondensatoren KO-UBK 010/I—R. Bosch GMBH, Stuttgart.

2-22. **Киреев А. П., Буров Е. М.** Исследование причин выхода из строя конденсаторов для электротермических установок.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1973, вып. 7(27), с. 17—18.

2-23. **Назаров Н. И., Соколов В. П.** Надежность силовых конденсаторов — Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. 1973, вып. 1(21), с. 34—35.

2-24. **Harrop P.** Selection of capacitors. — Electron, 1974, vol. 50, April 25, p. 47—50.

2-25. **Назаров Н. И.** Надежность силовых конденсаторов.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы. 1975, вып. 10(54), с. 28—33.

2-26. **Artbauer J.** Elektrische Dauerfestigkeit und Kurzzeitfestigkeit. — ETZ-A, 1970, Bd 91, № 6, S. 326—331.

2-27. **Варшавский Д. С., Варшавский А. Д.** Закономерности поведения силовых конденсаторов при длительном приложении переменного напряжения.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1975, вып. 9(53), с. 10—13.

2-28. **Улучшение** удельных характеристик и увеличение срока службы конденсаторов повышенной частоты/ Варшавский Д. С., Забашта И. Г., Чеховский И. Р. и др.— Кишинев: Штиинца, 1972, с. 237—244.

2-29. **Standard RS-401** (США). Paper, Paper/film, film dielectric SCR capacitors for power semi-conductor applications.

2-30. **Menkart G. R., Waldon P. L.** New S × T formula uses temperature and voltage as key to longer life capacitors. — CIGRE, 1964, S1/S8.

2-31. **Ackmann W.** Bedeutung von Langzeitprüfungen für Zuverlässigkeitsangaben bei Kondensatoren. — Elektrotechnische Zeitschrift, 1974, Bd 22, № 26, S. 690—692.

3-1. **Основы** теории цепей/ Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В. и др.— М.: Энергия, 1975. 751 с.

3-2. **Гиллемен Э. А.** Синтез пассивных цепей. М.: Связь, 1970. 720 с. с ил.

3-3. **Эпштейн С. Л.** Измерение характеристик конденсаторов.— М.— Л.: Энергия, 1971. 220 с.

3-4. **Petrikovits L.** Kondenzátorok kontaktsainak visgálate nonlinearitás métrés segitségével. — HIKI Közleméngei, 1968, köt. 8, № 3, 4, l. 47—56.

3-5. **Peterson V., Harris P. O.** Harmoning testing pinpoints passive component flaws.—«Electronics», 1966, vol. 39, № 14, p. 93—100.

3-6. **Нетушил А. В., Поливанов К. М.** Основы электротехники. Теория электромагнитного поля. М.: Госэнергоиздат, 1956. 192 с.

3-7. **Варшавский Д. С.** Перегрузочная способность конденсаторов повышенной частоты.— В кн.: Частота промышленного переменного тока и проблемы ее оптимизации. Кишинев: АН МССР, 1969, с. 155—161.

3-8. **Ермуратский В. В., Берзан В. П., Олещук В. И.** Частотные зависимости тангенса угла потерь конденсаторов МБГЧ.— В кн.: Повышение эффективности устройств преобразовательной техники. Киев: Наукова Думка, 1972, вып. 2, с. 174—178.

3-9. **Кременецкий И. И.** Электромагнитные явления в конденсаторах при воздействии синусоидального напряжения высокой частоты.— Электричество, 1973, № 11; с. 50—54.

3-10. **Stephanides H.** Gestzmussigkeiten und ursachen der schwingungen in kondensatoren bei stossentlagungen und hochfrequentenstromen. — Elektrotechnik und Maschinenbau, 1960, Bd 77, № 11, S. 253—261.

3-11. **Perigord M.** Apercu sur la technique du condensateur haute energie. — L'onde electrique, 1974, vol. 54, № 8, p. 399—404.

3-12. **Ермуратский В. В., Ермуратский П. В.** Схемы замещения конденсаторов в широкой полосе частот и расчет мощности при несинусоидальном напряжении.— В кн.: Современные задачи преобразовательной техники. Ч. 5. Киев: АН УССР, 1975, с. 92—101.

3-13. **Ермуратский В. В., Берзан В. П.** Определение допустимого рабочего напряжения силовых косинусных конденсаторов при частоте, отличной от номинальной.— В кн.: Эффективность повышения частоты промышленного переменного тока. Кишинев: Штиинца, 1975, с. 41—45.

3-14. **Ермуратский В. В., Берзан В. П.** Выбор конденсаторов для работы в силовых полупроводниковых преобразователях.— Тезисы докладов V Всесоюзной научно-технической конференции. Повышение эффективности силовых полупроводниковых приборов и преобразователей на их основе. М.: Информэлектро, 1975, с. 60—61.

3-15. **ТУ 16.527.167.72.** Конденсаторы для люминесцентных ламп.

3-16. **ОЖО 464.078.ТУ.** Конденсаторы комбинированные К75-10.

3-17. **ОЖО 464.116.ТУ.** Конденсаторы комбинированные К75-31.

3-18. **Ермуратский В. В.** Расчет установленной мощности конденсаторов типа МБГЧ в тиристорных преобразователях.— В кн.: При-

менение тиристорных преобразователей в электроэнергетике. Материалы I Всесоюзного научно-технического совещания М.: ЭНИН, 1972, вып. № 2, с. 140—144.

3-19. **Оптимальное** проектирование трехфазного автономного инвертора тока с помощью ЦВМ/ Завьялов В. И., Конев Ф. Б., Мустафа Г. М. и др.— Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1975, вып. 5(64), с. 16—18.

4-1. **Харкевич А. А.** Спектры и анализ. М.: Физматгиз, 1962.

4-2. **Высокочастотный** нагрев диэлектриков и полупроводников/ Нетушил А. В., Жуховицкий Б. Я., Кудин В. Н. и др.— М.— Л.: Госэнергоиздат, 1959. 480 с.

4-3. **Ермуратский В. В., Ермуратский П. В.** Определение параметров схем замещения диэлектрика и расчет потерь при несинусоидальном напряжении.— Электричество, 1975, № 11, с. 73—75.

4-4. **Ермуратский В. В., Ермуратский П. В.** Схема замещения конденсаторов в широкой полосе частот и расчет мощности потерь при несинусоидальном напряжении.— В кн.: Современные задачи преобразовательной техники. Ч. 5. Киев: АН УССР, 1975, с. 92—101.

4-5. **Богородицкий Н. П., Пасынков В. В.** Материалы радиоэлектронной техники. М.: Высшая школа, 1969. 424 с.

4-6. **Ермуратский В. В., Ермуратский П. В., Никифорова Е. С.** Нелинейное оценивание и графическое планирование эксперимента (на примере построения модели диэлектрических потерь в конденсаторе).— В кн.: Планирование и автоматизация эксперимента в научных исследованиях. М.: Советское радио, 1974, с. 176—189.

4-7. **Ермуратский П. В.** Планирование эксперимента при построении математических моделей свойств диэлектриков.— В кн.: Применение планирования эксперимента в радиоэлектронике и смежных областях. М.: МДНТП, 1975, с. 106—116.

4-8. **Линник Ю. В.** Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. М.: Физматгиз, 1962. 276 с.

4-9. **Картышев Б. И.** Стандартизация методики расчета потерь в конденсаторах для некоторых форм импульсного напряжения.— В кн.: Конденсаторы при несинусоидальных напряжениях. Кишинев: Штиинца, 1977, с. 23—27.

4-10. **Методы** расчета мощности потерь в конденсаторах типа МБГЧ при несинусоидальном напряжении/ Берзан В. П., Гураевский М. Н., Ермуратский В. В. и др.— Электротехника, 1974, № 9, с. 46—49.

4-11. **К методике** определения потерь в коммутирующих конденсаторах тиристорных преобразователей/ Багалей Ю. В., Биньков С. В., Шафоростов В. Я. и др.— Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, вып. 7(54), 1974, с. 17—20.

4-12. **Peysson J.** Condensateur soumis à des impulsion de tension prevision du echoffement. — Annales de Radioelectricite, 1956, vol. II, № 46, p. 19—24.

4-13. **Hagedorn H.** Berechnung der vedustleistung von Kondensatoren bei Belastung mit nicht sinus förmigen Weshselspannungen.— Frequenz, 1965, vol. 19, № 11, p. 370—374.

4-14. **Лернер М. М.** Учет длительности нарастания несинусоидального напряжения при расчете потерь в конденсаторе.— Электричество, 1971, № 2, с. 69—72.

4-15. **Басов А. П., Загорский В. Г., Козляев Ю. Д.** Исследование потерь в конденсаторах при трапецеидальной и гребенчатой формах

напряжения.— В кн.: Современные задачи преобразовательной техники. Киев: АН УССР, 1975, ч. 1, с. 136—145.

4-16. **Басов А. П., Загорский В. Т., Козляев Ю. Д.** Условия работы конденсаторов в устройствах принудительной коммутации.— В кн.: Повышение эффективности устройств преобразовательной техники. Киев: Наукова думка, 1972, ч. 2, с. 197—202.

4-17. **Гоголицын Л. З.** Определение потерь в конденсаторах при импульсном режиме.— Электричество, 1957, № 9, с. 42—45.

4-18. **Ермуратский В. В., Ермуратский П. В.** Расчет мощности тепловыделения в конденсаторах при типовых формах напряжения.— Электричество, 1976, № 11, с. 45—51.

4-19. **Гончаров Ю. П., Панасенко Н. В., Ермуратский В. В.** Мощность потерь в конденсаторах МБГЧ при работе в узлах коммутации автономных инверторов.— Электроэнергетика и автоматика. Кишинев: Штиинца, 1974, вып. 19, с. 25—31.

4-20. **Гончаров Ю. П., Панасенко Н. В., Ермуратский В. В.** Расчет допустимого напряжения на коммутирующих конденсаторах в автономных инверторах.— Электротехника, 1975, № 7, с. 15—18.

4-21. **Gross B.** Über dielektrische Verluste bei periodischer Rechteckspannung. — Frequenz, 1958, Bd 12, № 7.

4-22. **Ануфриев Ю. А., Картышев Б. И.** Некоторые общие случаи расчета потерь в конденсаторах, работающих в импульсном режиме.— Электронная техника. Серия 8. Радиодетали, 1969, вып. 4(17), с. 3—13.

4-23. **Круглов А. А.** К вопросу определения диэлектрических потерь в изоляции радиотехнических деталей, работающих в импульсном режиме.— Изв. ЛЭТИ, вып. 57, ч. III, с. 60—65.

4-24. **Егудин Л. М.** Определение потерь в конденсаторах при несинусоидальной форме напряжения.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1974, вып. 3(35), с. 9—13.

4-25. **Ермуратский В. В.** К вопросу определения максимальной мощности потерь в конденсаторах, работающих в импульсном режиме.— Электроэнергетика и автоматика. Кишинев: Штиинца, 1975, вып. 23, с. 69—76.

4-26. **Ануфриев Ю. А., Гураевский М. Н., Ермуратский В. В.** Существуют ли конденсаторные парадоксы? — В кн.: Конденсаторы при несинусоидальном напряжении. Кишинев: Штиинца, 1977, с. 12—17.

4-27. **Лернер М. М.** О границах диапазона возможных потерь в безындукционном электрическом конденсаторе при воздействии несинусоидального напряжения.— Электричество, 1974, № 5, с. 68—71.

4-28. **Ануфриев Ю. А., Белоручко Н. И.** К расчету потерь энергии в конденсаторах при импульсных нагрузках.— Электронная техника. Серия 8. Радиодетали, 1969, вып. 2(15), с. 75—79.

4-29. **Ермуратский В. В., Берзан В. П., Гуцул И. С.** Зависимость мощности потерь в диэлектрике конденсаторов от параметров трапецеидального напряжения.— Электроэнергетика и автоматика. Кишинев: Штиинца, 1975, вып. 22, с. 58—66.

4-30. **Ермуратский В. В.** Расчет на ЭЦВМ мощности потерь в диэлектрике конденсаторов силовых полупроводниковых устройств.— В кн.: Динамика систем управления. Кишинев: Штиинца, 1975, часть 1, с. 185—190.

4-31. **Ермуратский В. В.** Расчет на ЭЦВМ мощности потерь в конденсаторном диэлектрике при несинусоидальном напряжении.— Электротехническая промышленность. Аппараты высокого напряже-

ния, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1975, вып. 9(53), с. 14—16.

4-32. New 28F Series Capacitors for SCR Commutation Applications. — Standard rating range from 0,25 150 μF, 200 to 2000 Volts max. — General Electric.

5-1. **Ермуратский В. В.** Определение допустимых параметров несинусоидального напряжения на конденсаторах МБГЧ тиристорных преобразователей.— Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1973, вып. 4(39), с. 26—28.

5-2. **Исследование** возможности расширения области применения накопительских конденсаторов/ Степина К. И., Ушанова В. А., Иванов С. Б. и др.— Электронная техника. Серия 5. Радиодетали, 1973, вып. 1(39), с. 49—56.

5-3. **Ермуратский В. В., Олещук В. И.** Использование пространства основных параметров для упрощения определения допустимой амплитуды трапецеидального напряжения на конденсаторах.— Электроэнергетика и автоматика. Кишинев: Штиинца, 1974, вып. 20, с. 17—20.

5-4. **Ермуратский В. В., Олещук В. И.** Применение конденсаторов типа К75-10 в тиристорных преобразователях.— Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1974, вып. 7(54), с. 20—21.

5-5. **Основные** принципы выбора металлобумажных конденсаторов для коммутирующих контуров тиристорных преобразователей.— Материалы VIII научно-технической конференции по вопросам автоматизации производства. Вентильные преобразователи частоты/ Берзан В. П., Ермуратский В. В., Гураевский М. Н. и др. Томск, ТГУ, 1974.

5-6. **Ануфриев Ю. А.** Расчет и применение силовых конденсаторов.— Электронная промышленность. 1974, № 5, с. 22—29.

5-7. **Ермуратский В. В.** Определение допустимых параметров несинусоидального напряжения на конденсаторах МБГЧ тиристорных преобразователей.— Электротехническая промышленность. Преобразовательная техника, 1973, вып. 4, с. 26—28.

5-8. **Ермуратский В. В., Олещук В. И.** Использование в тиристорных преобразователях конденсаторов типа К75-10 в качестве коммутирующих.— Электроэнергетика и автоматика. Кишинев, Штиинца, 1974, вып. 18, с. 23—27.

5-9. **Ермуратский В. В., Олещук В. И., Штейнберг Е. Д.** Применение конденсаторов типа К42-15 в тиристорных преобразователях.— Электроэнергетика и автоматика. Кишинев: Штиинца, 1973, вып. 17, с. 3—10.

5-10. **Ермуратский В. В.** Расчет установленной мощности конденсаторов МБГЧ в тиристорных преобразователях.— В кн.: Применение тиристорных преобразователей в электроэнергетике. М.: ЭНИН, 1972, вып. 2, с. 140—144.

5-11. **Гончаров Ю. П., Панасенко Н. В., Ермуратский В. В.** Расчет допустимого напряжения на коммутирующих конденсаторах в автономных инверторах.— Электротехника, 1975, № 7, с. 15—18.

5-12. **Области** рационального применения конденсаторов типа МБГЧ, К75-10, К42-15, КС, ЭС при трапецеидальном напряжении/ Ермуратский В. В., Берзан В. П., Гуцул И. С. и др.— В кн.: Современные задачи преобразовательной техники. Киев: АН УССР, 1975, ч. 5, с. 84—92.

5-13. **Ермуратский В. В., Берзан В. П.** Определение допустимого рабочего напряжения силовых косинусных конденсаторов при частоте отличной от номинальной.— В кн.: Эффективность повышения частоты промышленного переменного тока. Кишинев: Штиинца, 1975, с. 41—45.

5-14. **Ермуратский В. В., Берзан В. П.** Допустимые импульсные токовые нагрузки силовых косинусных конденсаторов.— В кн.: Электроэнергетика и автоматика. Кишинев: Штиинца, 1975, вып. 22, с. 51—58.

5-15. **Ануфриев Ю. А., Мезенин О. Л.** Выбор коммутирующего конденсатора тиристорного преобразователя.— В кн.: Конденсаторы при несинусоидальных напряжениях. Кишинев: Штиинца, 1977, с. 3—12.

5-16. **Geen J. A.** The thermal rating of metallized film capacitors under pulse conditions. — The Radio and Electronic Engineer, 1974, vol. 44, № 4, April, p. 218—226.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Глава первая

Условия работы конденсаторов в тиристорных преобразователях

1-1. Функции конденсаторов в тиристорных преобразователях 6
1-2. Коммутирующие конденсаторы 10
1-3. Демпфирующие конденсаторы 16
1-4. Фильтровые конденсаторы 22
1-5. Компенсирующие конденсаторы 28
1-6. Требования к конденсаторам для тиристорных преобразователей 33

Глава вторая

Основные физико-химические процессы в конденсаторах и их влияние на долговечность конденсаторов

2-1. Поляризация диэлектрика 35
2-2. Частичные разряды 44
2-3. Тепловые процессы в конденсаторах 51
2-4. Долговечность конденсаторов 67

Глава третья

Работа конденсаторов при синусоидальном напряжении

3-1. Схемы замещения конденсаторов 88
3-2. Расчет мощности потерь энергии 101
3-3. Определение допустимых режимов работы конденсаторов 103
3-4. Выбор конденсаторов 111
3-5. Удельные параметры конденсаторов 118

Глава четвертая

Работа конденсаторов при несинусоидальном напряжении

4-1. Схемы замещения конденсаторов в широком диапазоне частот 124
4-2. Мощность потерь в диэлектрике конденсатора при несинусоидальном напряжении 138
4-3. Расчет потерь в металлических частях конструкции конденсатора 146
4-4. Расчет потерь в конденсаторах при типовых формах напряжения 149

Глава пятая

Выбор конденсаторов для работы при несинусоидальном напряжении

5-1. Определение допустимого рабочего напряжения несинусоидальной формы 167
5-2. Удельные параметры конденсаторов при несинусоидальном напряжении 179
5-3. Общие принципы выбора конденсаторов 182
5-4. Выбор конденсаторов для работы при напряжении типовой формы 193
Заключение 203
Приложение 1. Основные параметры конденсаторов для силовых преобразовательных устройств 204
Приложение 2. Основные параметры конденсаторов для синусоидального напряжения 208
Список литературы 212

ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ ЕРМУРАТСКИЙ
ПЕТР ВАСИЛЬЕВИЧ ЕРМУРАТСКИЙ

Конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях

Редактор А. Г. Придатков
Редактор издательства Л. А. Решмина
Художественный редактор Д. И. Чернышев
Обложка художника Е. Н. Волкова
Технический редактор Н. П. Собакина
Корректор М. Г. Гулина

ИБ № 1209

Сдано в набор 29.03.79 Подписано в печать 22.08.79 Т-15908
Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2 Гарн. шрифта литературная
Печать высокая Усл. печ. л. 11,76 Уч.-изд. л. 12,66
Тираж 10 000 экз. Заказ 102 Цена 65 к.

Издательство «Энергия», 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

65 к.